

Jussi Ollikkala

**Nokka-akselin suunnittelu kilpamoottoriin**

Opinnäytetyö

Kevät 2014

Tekniikan yksikkö

Auto- ja työkonetekniikan koulutusohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Koulutusohjelma: Kone- ja tuotantotekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Auto- ja työkonetekniikka

Tekijä: Jussi Ollikkala

Työn nimi: Nokka-akselin suunnittelu kilpamoottoriin

Ohjaaja: Ari Saunamäki

Vuosi: 2014

Sivumäärä: 78

Liitteiden lukumäärä: 8

---

Tässä opinnäytetyössä perehdytään ottomoottorin nokka-akselien toimintaan ja suunnitellaan imuokka-akseli kilpamoottoriin. Työssä käsitellään nokka-akseliinkin, venttiilikoneistoon ja kaasunvaihtoon liittyviä keskeisiä asioita ja pyritään huomioimaan näiden vaikutukset kilpamoottorin suorituskykyyn.

Suunnittelun nokka-akselin toiminta varmistetaan huomioimalla liikkuville osille määrätyt kiihtyvyyksien ja nopeuksien raja-arvot. Nokka-akselin ja kilpamoottorin korkean käyntinopeuden vaikutukset imuventtiiliin selvitetään tietokonepohjaisen FEM-laskennan avulla.

Suunnittelun kohteena toimii rallin f-ryhmän säännöt täyttävän Toyota Corolla AE86 GT:n vapaasti hengittävä moottori, joka on Suomessa vielä nykypäivänäkin yleinen virityskohde.

Asiasanat: polttomoottorit, kilpa-autot

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## **Thesis abstract**

Faculty: School of Technology

Degree programme: Mechanical and Production Engineering

Specialisation: Automotive and Work Machine Engineering

Author: Jussi Ollikkala

Title of thesis: Design of the race engine camshaft

Supervisor: Ari Saunamäki

Year: 2014

Number of pages: 78

Number of appendices: 8

---

This thesis deals with the camshafts of the carburettor engines and design of the race engine cams. The thesis covers the main points of the camshafts, valve gears and breathing of the four-stroke engine. Taking the effects of them into account is important when thinking of the race car engine efficiency.

The limits of the moving parts acceleration and speed are noticed in order to ensure the function of the designed camshaft. The effects of the cam profile and high running speed for the intake valve have been found out by the computer-assisted FEM calculation.

Design work was made for the group-f Toyota Corolla AE86 GT rally car engine. Even though the car is old it is still common in Finland to make engine trimming for the Toyota 4A-GE engine.

Descriptors: combustion engine, racing cars

## SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	2
Thesis abstract.....	3
SISÄLTÖ.....	4
Kuvio- ja taulukkoluetelo.....	6
Käytetyt termit ja lyhenteet .....	8
1 JOHDANTO .....	9
2 VENTTIILIKONEISTO.....	10
2.1 Toimintaperiaate .....	10
2.2 DOCH-rakenne .....	12
3 KAASUNVAIHTO.....	13
3.1 Kaasunvaihto kiinteällä venttiiliajoituksella.....	13
3.2 Venttiilien aukiolo .....	13
3.3 Venttiiliajoitus .....	14
3.4 Overlap .....	16
3.5 Venttiilijousen toiminta ja massavoimat.....	17
4 NOKKA-AKSELI.....	19
4.1 Profiili .....	20
4.1.1 Kolmikaariprofiili.....	20
4.1.2 Tasanopeus-profiili.....	22
4.1.3 Parabolinen profiili .....	23
4.1.4 SHM-profiili .....	24
4.1.5 Sykloidi-profiili .....	25
4.1.6 Multi-sine-wave -profiili.....	26
4.1.7 Profiilin merkitys.....	27
4.2 Nosto.....	28
4.3 Nokkakulma .....	29
4.4 Esinokka-alue.....	30
5 SUUNNITTELUN KOHDE.....	32
5.1 Venttiilikoneisto .....	33

5.2 Sylinterikannen virtausominaisuudet.....	34
<b>6 VERTAILUAKSELIT .....</b>	<b>37</b>
6.1 Imunokka-akseli .....	37
6.2 Pakonokka-akseli .....	42
6.3 Nokka-akseleiden yhteistoiminta.....	46
<b>7 UUSI NOKKAPROFIILI .....</b>	<b>48</b>
7.1 Venttiilinousu.....	48
7.2 Venttiilin ja männän välinen etäisyys.....	48
7.3 Sylinteritäytös.....	49
7.4 Profiili .....	50
7.5 Esinokka-alue.....	55
7.6 Venttiilin aukioloaika.....	55
7.7 Ajoitus .....	57
7.8 Sylinteritäytöksen muutos .....	59
7.9 Profiilin vaatimukset venttiilijouselle .....	60
7.10 Seuraajaan kohdistuva rasitus .....	63
7.11 Venttiilivällys .....	64
7.12 Imuventtiiliin kohdistuva rasitus.....	66
7.12.1 Venttiilin lukitusuran maksimijännitykset .....	67
7.12.2 Venttiilivarren maksimijännitykset .....	69
7.12.3 Varmuusluku väsymisen suhteen .....	71
<b>8 YHTEENVETO.....</b>	<b>74</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>76</b>
<b>LIITTEET .....</b>	<b>78</b>

## Kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuvio 1. Venttiilikoneiston toimintaperiaate.....	11
Kuvio 2. DOCH-sylinterikannella varustettu moottori. ....	12
Kuvio 3. Alimitoitettun venttiilijousen vaikutukset (Heisler 2001, 40).....	18
Kuvio 4. Nokkaprofiilin osa-alueet.....	19
Kuvio 5. Kolmikaariprofiili (Heisler 2001,28). ....	20
Kuvio 6. Kolmikaariprofiilin ominaisuudet (Heisler 2001, 28). ....	21
Kuvio 7. Tasanopeusprofiili.....	22
Kuvio 8. Paraboloidisen profiilin ominaisuudet (Heisler 2001, 30). ....	23
Kuvio 9. SHM-profiili (Heisler, 2001, 31). ....	24
Kuvio 10. Sykloidi-profiili (Heisler 2001, 32).....	25
Kuvio 11. Multi-sine-wave -profiili (Heisler 2001, 33). ....	26
Kuvio 12. Epäsymmetrinen nokkaprofiili (Moon 1961, L-2).....	27
Kuvio 13. Nosto.....	28
Kuvio 14. Nokkakulma (yksinokkainen rakenne).....	29
Kuvio 15. Yksinkertainen ramppi.....	31
Kuvio 16. Kaksivaiheinen ramppi. ....	31
Kuvio 17. Kohdemoottori, Toyota 4A-GE. ....	32
Kuvio 18. 4A-GE:n venttiilikoneisto. ....	33
Kuvio 19. Sylinterikannen virtausmittaus. ....	34
Kuvio 20. Imukanavan virtauskuvaaja [cfm].....	36
Kuvio 21. Imukanavan virtauskuvaaja [l/s]. ....	36
Kuvio 22. Nokka-akselin profiilin määrittäminen.....	38
Kuvio 23. Imunokka-akselin profiilikuvaaja. ....	38
Kuvio 24. Imunokka-akselin nopeuskuvaaja. ....	40
Kuvio 25. Imunokka-akselin kiihtyvyysskuvaaja.....	40
Kuvio 26. Imunokka-akselin ramppialue. ....	41
Kuvio 27. Pakonokka-akselin profiilikuvaaja. ....	43
Kuvio 28. Pakonokka-akselin nopeuskuvaaja. ....	44
Kuvio 29. Pakonokka-akselin kiihtyvyysskuvaaja. ....	44
Kuvio 30. Pakonokka-akselin ramppialue. ....	45
Kuvio 31. Malliakseleiden toiminta. ....	47

Kuvio 32. Männän venttiiliväistöt.....	49
Kuvio 33. Suunniteltu nokkaprofiili.....	53
Kuvio 34. Suunnitellun profiilin nopeuskuvaaja.....	54
Kuvio 35. Suunnitellun profiilin kiihtyvyysskuvaaja.....	54
Kuvio 36. Esinokka-alueen profiili.....	55
Kuvio 37. Venttiilin aukioloajan muutos.....	57
Kuvio 38. Suunnitellun profiilin ajoituskuvaaja.....	58
Kuvio 39. Jousipaineen mittaus.....	62
Kuvio 40. Nokka-akseli venttiiliväläyksen mittausasennossa.....	65
Kuvio 41. Imuventtiilin 3D-malli.....	66
Kuvio 42. Lukitusuraan kohdistuva puristusjännitys.....	67
Kuvio 43. Lukitusuraan kohdistuva vetojännitys.....	68
Kuvio 44. Venttiilivarren suurin puristusjännitys.....	69
Kuvio 45. Venttiilivarren suurin vetojännitys.....	70
Kuvio 46. Koon vaikutusluku pyörötangolle (MET 1994).....	72
Kuvio 47. Pinnanlaatukerroin (MET 1994).....	72
Taulukko 1. Imukanavan virtausominaisuudet.....	35
Taulukko 2. Imunokkaprofiilin ramppialue.....	41
Taulukko 3. Pakonokkaprofiilin ramppialue.....	45
Taulukko 4. Malliakseleiden ominaisuudet.....	46
Taulukko 5. Uusi nokka-akselipari.....	58
Taulukko 6. Venttiilikoneiston osien massat.....	62

## Käytetyt termit ja lyhenteet

<b>Inertia</b>	Kappaleen taipumus vastustaa liiketilan muutosta.
<b>DOCH</b>	Kahdella sylinterikannen yläpuolisella nokka-akselilla varustettu venttiilikoneistorakenne.
<b>SOHC</b>	Yhdellä sylinterikannen yläpuolisella nokka-akselilla varustettu venttiilikoneistorakenne.
<b>Overlap</b>	Imu- ja pakoventtiilien yhtäaikainen aukiolo.
<b>YKK</b>	Männän yläkäännekohta.
<b>AKK</b>	Männän alakäännekohta.
<b>JYKK</b>	Jälkeen männän yläkäännekohdan.
<b>EYKK</b>	Ennen männän yläkäännekohtaa.
<b>cfm</b>	Kuutiojalkaa minuutissa (Cubic feet per minute).



# 1 JOHDANTO

Moottoriurheilu ja kilpatoiminta ovat olleet kautta aikojen autoalan uusien innovaatioiden ja kehitystyön lähde. Kilpailujen tasaisuus ja kunnianhimo ovat johdattaneet etsimään yhä parempia ja toimivampia teknisiä sovelluksia ja lisänneet tarkan suunnittelun merkitystä kilpa-autoissa. Kenties tunnetuimpana autoalan esimerkkinä suunnittelutyön ja innovaatioiden osalta voidaan pitää Formula 1 -sarjan kilpa-autojen alituista kehittämistä suurin määrärahoihin. Rata- ja rallisarjojen yhteydessä tehdyt tekniset sovellukset rantautuvatkin monesti myös tavalliseen henkilöauto-maailmaan muutamien vuosien viiveellä. Parempaa kilpa-autoa suunniteltaessa moottorin suorituskyvyn lisääminen on aina ollut jatkuvan kehitystyön kohteena.

Tämän opinnäytetyön aihe on syntynyt suuresta kiinnostuksesta moottoritekniikkaa ja kilpamoottoreita kohden. Opinnäytetyön yhteistyöyrityksenä on Suomessa kilpamoottoreiden valmistuksesta, varsinkin ralliautoilun puolelta tunnetuksi tullut Mikkeliäinen Speedfactory. Omakohtainen kokemus kilpamoottoreiden suorituskyvyn parantamisesta ja niiden rakenteista sekä asiantuntija-apu Speedfactory:n Pasi Laukkaselta loi hyvän pohjan nokka-akselien tutkimiseen.

Työssä tullaan perehtymään nelitahtisen ottomoottorin nokka-akselien vaikutuksiin moottorin suorituskyvylle sekä suunnittelemaan järjestelmällisesti uutta imunokka-akselia kilpamoottoriin. Esimerkkimoottorina toimii Toyotan 16-venttiilinen 4A-GE DOCH-moottori, joka on hyvin yleinen Suomen ralliautoilussa. Työssä yhdistetään nokka-akselien toiminnan teoria, käytännön mittaukset ja olemassa olevien profiilien tutkiminen. Eri komponentteihin kohdistuvia rasituksia tutkitaan venttiilikoneiston kestävyuden varmistamiseksi. Tavoitteena olevan uuden nokka-akseliprofiilin luomisen lisäksi työ voi toimia oppaana viritysnokka-akseliprofiilin valinnassa ja auttaa ymmärtämään syvällisemmin eri nokka-akselin piirteiden vaikutukset ottomoottorin suorituskykyyn.

## 2 VENTTIILIKONEISTO

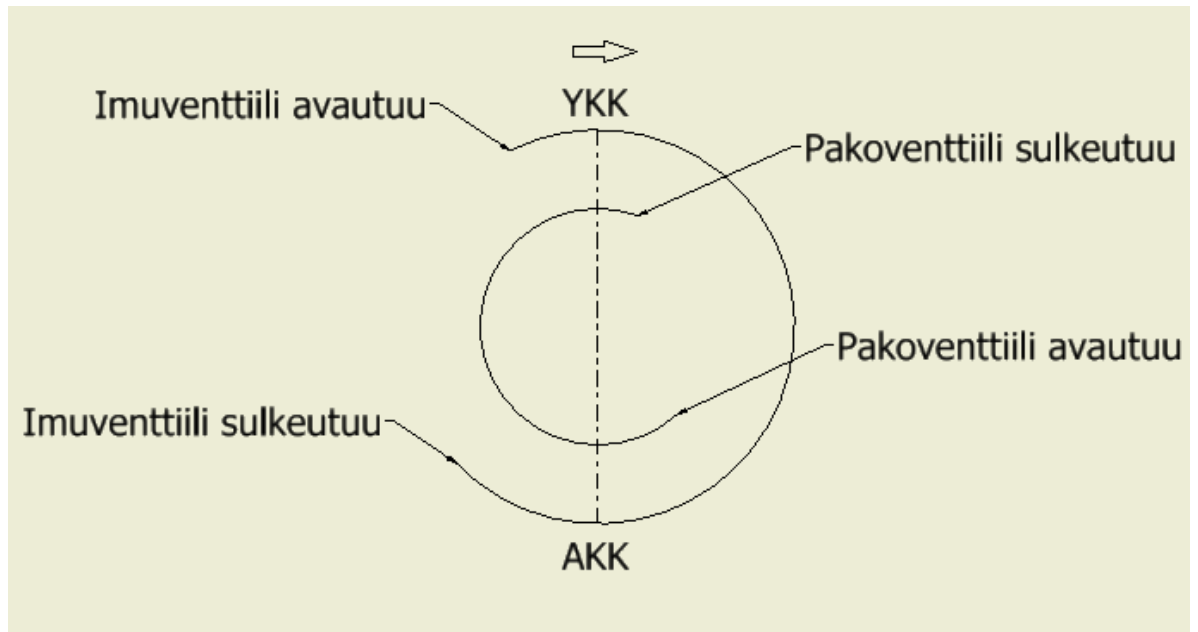
Polttomoottorin kaasunvaihtoa ohjaa joko yksi tai kaksi erillistä nokka-akselia, jotka saavat käyttövoimansa kampiakselilta. Nokka-akseleiden tehtävänä on avata imu- ja pakoventtiileitä palaneiden kaasujen poistamiseksi ja uuden seoksen sisään ottamiseksi. Nokka-akseleiden valinnan ja suunnittelun kannalta onkin olennaista ymmärtää venttiilikoneiston toimintaperiaate.

### 2.1 Toimintaperiaate

Pakoventtiili avautuu jo hieman ennen kampiakselin alakäännepaikkaa. Suuresta ulkoilman ja sylinterin sisäisestä paine-erosta johtuen jopa noin 50 % pakokaasusta virtaa jo tässä niin sanotussa esipoistovaiheessa ulos sylinteristä. Pakotahdin aikana ylöspäin nouseva mäntä poistaa suurimman osan jäljelle jääneestä kaasusta venttiilin ajoituksesta riippuen. (Autoteknillinen taskukirja 2003, 425–426.)

Vähän ennen männän saavuttamaa yläkäännepaikkaa imuventtiili aloittaa aukeamisen. Tällöin syntyy overlap-tilanne, jossa imu- ja pakoventtiili ovat yhtä aikaa avautuneina. Pakoventtiili sulkeutuu vasta hieman yläkäännepaikkadan jälkeen. Imuventtiilin aukiolo päättyy vasta alakäännepaikkadan jälkeen, sillä tietyn inertian saavuttanut uusi täytös virtaa vielä hetken sylinteriin, vaikka mäntä olisikin jo nousemassa uudelleen ylöspäin. Lopun puristustahdistista molemmat venttiilit ovat kiinni mahdollistaen paineen nousun sylinterissä. Työtahdin aikana venttiilit ovat myös suljettuina, kunnes pakoventtiili aloittaa uuden aukeamisen hieman ennen alakäännepaikkaa. (Autoteknillinen taskukirja 2003, 425–426.) Venttiilikoneiston perusperiaate käy helposti ilmi kuvion 1 toimintakuvaajasta.

Polttomoottorin suorituskyky muodostuu polttoaineen sisältämän energian muuttamisesta lämmöksi ja siitä mekaaniseksi työksi (Autoteknillinen taskukirja 2003, 406). Täten on selvää, että mitä enemmän polttoaineen ja ilman oikeanlaista seosta saadaan yhden työkierron aikana muutettua kampiakselin liike-energiaksi, sitä paremmat teho- ja vääntöominaisuudet moottorista on saatavilla.



Kuvio 1. Venttiilikoneiston toimintaperiaate.

## 2.2 DOCH-rakenne

Ottomoottorin venttiilikoneistot jaetaan erilaisiin rakennetyyppeihin riippuen nokka-akseleiden määrästä, sijainnista ja venttiilien ohjaustypistä. Venttiilikoneistot ovatkin kehittyneet ajan saatossa vanhoista työntötanko-ohjauksista nykyisin yleisiin nostin- ja rullakeinuvipuhjauksiin. Voisi kuvitella, että tulevaisuudessa elektroniikan yhä lisääntyessä myös elektronisesti ohjatut venttiilikoneistot olisivat käytössä normaaleissa henkilöauton polttomoottoreissa (Renault 12.2008).

DOCH-sylinterikansi tarkoittaa rakennetta, jossa venttiilikoneisto koostuu kahdesta sylinterikannen yläpuolisesta nokka-akselista ja nostin- tai rullakeinuhjatuista venttiileistä. DOCH-lyhenne tulee englanninkielisistä sanoista double overhead camshaft. Nykymoottoreissa kyseinen rakennetyyppi on hyvin yleinen (kuvio 2).

DOCH-rakenne mahdollistaa imu- ja pakosarjojen sijoittamisen sylinterikannen vastakkaisille puolille, jolloin imuilman epäedullista lämpenemistä pakosarjan vaikutuksesta voidaan vähentää. Tämä on erittäin hyödyllistä varsinkin kilpakäytössä. Kahden erillisen nokka-akselin käyttö mahdollistaa myös imu- tai pakopuolen venttiiliajoituksen muuttamisen erikseen.



Kuvio 2. DOCH-sylinterikannella varustettu moottori.

### 3 KAASUNVAIHTO

Kuten edellä todettiin, ohjaavat nokka-akselit polttomoottorin kaasunvaihtotapah-  
tumia. Kaasunvaihtoon vaikuttaa oleellisesti venttiilien aukioloaika, venttiilien ajoit-  
us ja niin sanottu overlap-jakso. Kaasunvaihtoa ohjaavia nokka-akseleita tutkitta-  
essa täytyy tutustua myös venttiilit sulkevien venttiilijousten vaatimuksiin.

#### 3.1 Kaasunvaihto kiinteällä venttiiliajoituksella

Perinteisellä kiinteällä venttiiliajoituksella toimivaa nokka-akselia tutkiessa törmä-  
tään hyvin yleisesti seuraavaan ongelmaan. Alhaisella moottorin käyntinopeudella  
imukanavasta sylinteriin virtaavan polttoaineen virtausnopeus on suhteellisen pie-  
ni. Tällöin puristustahdin alussa mäntä työntää avoimen imuventtiilin kautta vähäi-  
sen liike-energian sisältävän seoksen helposti takaisin imukanavaan. Vastaavan  
kaltainen epäkohta syntyy imutahdin alussa, jolloin alaspäin liikkuva mäntä imee  
ulosvirtaavaa pakokaasua takaisin sylinteriin pakoverventtiin ollessa vielä auki. Näi-  
den tapahtumien vaikutuksesta sylinteriin imetyn uuden seoksen määrä vähenee  
ja moottorin suorituskyky alakierroksilla laskee. Edellä esitetyn perusteella voi-  
daankin sanoa, että pienillä moottorin käyntinopeuksilla nokka-akselin tulisi sulkea  
venttiilit suhteellisen varhaisessa vaiheessa. Vapaasti hengittävän bensiinimootto-  
rin huipputeho esiintyy kuitenkin yläkierroksilla. Tämän vuoksi venttiilien aukioloai-  
kojen tulisi olla huomattavasti pidempiä, jotta sylinteriin ehdittäisiin saada riittävä  
määrä uutta polttoaineseosta. Täten perinteinen kiinteä nokka-akseli on aina jon-  
kinasteinen kompromissi moottorin ylä- ja alakierrosten ominaisuuksien välillä.  
(Mauno 2005, 31.)

#### 3.2 Venttiilien aukiolo

Kuten edellä on jo todettukin, pakoverventtiin avautuminen ennen työtahdin ala-  
kuolokohtaa mahdollistaa suuren pakokaasun ulosvirtauksen ilman männän teke-  
mää työtä. Tällöin kampiakselin rotaatioenergiaa ei tarvitse käyttää kuin osan pa-  
kokaasun poistoon, mikä kasvattaa väkisinkin moottorin hyötysuhdetta.

Imuventtiilin aukioloajan optimoinnilla voidaan vaikuttaa myös suuresti sylinteritäytökseen. Imuventtiilin ohitse virtaavalla polttoaineen ja ilman seoksella on tietty tiheys ja täten jokin massa. Fysiikan lakien perusteella virtaavalla seoksella on tällöin myös tietty liikemäärä. Näin ollen seos pystyy virtaamaan lyhyen ajan sylinteriin, vaikka mäntä nousisikin jo ylöspäin puristustahdin ollessa käynnissä.

Mahdollisimman suuri täytös saadaan aikaan, mikäli imuventtiili sulkeutuu vasta, kun männän aiheuttama imukanavan suuntaan vaikuttava paine voittaa sisään virtaavan seoksen inertian. Imuventtiilin sulkeutuessa liian myöhään osa jo sylinteriin imetystä seoksesta palautuu takaisin imukanavaan pienentäen sylinterin täytösastetta.

Vieläkin suurempana haittavaikutuksena maksimitehon kannalta on sylinterin puristuspaineen laskeminen. Puristusiskunpituus lyhenee huomattavasti, mikäli puristustahdin aikana mäntä työntää seosta ulos imukanavaa pitkin eikä muodosta painetta sylinteriin. Heislerin (2001, 4) esimerkin mukaan moottorin käydessä pienillä kierroksilla ja kaasuläpän ollessa täysin auki puristuspaine voi laskea hetkeksi jopa 30 %, mikäli imuventtiili sulkeutuisi 60 astetta alakäännepäätien jälkeen. Tällöin sylinterin täytösaste laskee myös noin 20 %. Tämän kaltainen tilanne voisi syntyä esimerkiksi täyskiihdytyksessä paikaltaan.

### 3.3 Venttiiliajoitus

Kilpakäytössä nokka-akseleiden ajoitusarvot ovat huomattavasti poikkeavat normaaleihin henkilöliikennekäytössä oleviin polttomoottoreihin verrattuna. Tämä johtuu kaasujen suuremmista virtausnopeuksista ja moottorin korkeammasta sekä kapeammasta käyttökierrosalueesta. Kilpamoottoreissa ei myöskään kiinnitetä niin suurta huomiota pakokaasupäästöihin.

Puhuttaessa nokka-akselin ajoituksesta asteina on kyseessä aina kampiakselin asteluku. Ajoitusarvo ilmoitetaan numerosarjan avulla, jossa ensimmäinen luku tarkoittaa venttiilin avautumishetkeä ja jälkimmäinen luku ilmoittaa sulkeutumishetken. Imunokka-akselin ajoitusarvo 27/52 tarkoittaisi siis, että venttiili aloittaa aukeamisen 27 astetta ennen imutahdin yläkäännepäätien ja sulkeutuisi 52 astetta

alakäännepohdan jälkeen. Mikäli kyseessä olisi saman ajoitusarvon omaava pakonokka-akseli, avautuisi pakoventtiili 27 astetta ennen alakuoloa ja sulkeutuisi 52 astetta varsinaisen pakotahdin yläkäännepohdan jälkeen.

Kyseisiin arvoihin liittyy kuitenkin suuren huomion arvoinen seikka. Ilmoitettu aste-luku saattaa tarkoittaa hetkeä, jolloin venttiili aloittaa avautumisliikkeen, mutta myös muunkaltaisia ilmoitustapoja on olemassa. Amerikkalaisissa nokka-akseleissa kulma-astetta lähdetään mittaamaan hyvin usein vasta 0.050 tuuman, eli 1,27 mm:n avautumasta lähtien. HKS:n valmistamissa nokka-akseleissa on törmätty ajoitusarvoihin, jotka ilmoitetaan niin sanotusti millistä milliin. Tällöin mitaus aloitetaan vasta millimetrin aukeaman jälkeen ja lopetetaan yhtä millimetriä ennen venttiilin sulkeutumista. Kyseessä oleva ilmoitustapa tulee siis aina huolellisesti varmistaa, sillä eri valmistajat käyttävät erilaisia ilmoitustapoja.

Jokaisella moottorien parissa harrastavalla henkilöllä ei välttämättä ole ajoitusarvon määrittämistä helpottavaa suurta astelevyä. Kokemuspohjaisesti onkin huomattu työn helpottuvan, mikäli puhutaan pelkästään millimetriarvoista. Tällöin ilmoitetaan millimetriarvo, jonka imu- ja pakoventtiilit ovat avautuneina kampiakselin yläkäännepohdassa; pakotahdin loppuvaiheella ja imutahdin alkaessa. Kilpamoottorin nokka-akselista puhuttaessa tilanne voi olla esimerkiksi niin, että imuventtiili on avautuneena 4 mm ja pakoventtiili samassa tilanteessa 3,5 mm. Kyseinen ilmoitustapa on käytännönläheinen, sillä venttiilinajoitus voidaan toteuttaa pelkästään mittakellolla mitaten ilman astelevyä. Tämä ei kuitenkaan anna yhtä hyvää kuvaa nokka-akselin profiilista kuin asteluvulla ilmoittaminen.

Nokka-akseleiden ajoituksen yhteydessä puhutaan usein nokan aikaistamisesta tai sen kääntämisestä myöhäisemmälle. Nokka-akselin aikaistuksessa akselia käännetään myötäpäivään, jolloin venttiilit aloittavat avautumisen aiemmin kampiakselin asemaan nähden. Nokka-akselien kääntäminen niin sanotusti myöhäisemmälle tapahtuu päinvastaisesti. Kahdella nokka-akselilla varustetussa moottorissa nokkien ajoitusta muuttamalla vaikutetaan samalla myös nokkakulmaan. Yksinokkaisessa rakenteessa nokkakulma ja overlap-jakson pituus ei muutu, sillä ajoitus muuttuu yhtä paljon sekä imu- että pakopuolella (Bell 2007, 5.13).

### 3.4 Overlap

Mahdollisimman suureen sylinteritäytökseen pyrittäessä imuventtiilin tulisi aueta siis jo ennen varsinaista imutahdin alkua. On kuitenkin olemassa vaara, että imuventtiili aukeaa liian aikaisin, jolloin osa poistuvasta pakokaasusta pyrkii purkautumaan imuventtiilin ohitse imukanavaan hidastaen uuden polttoaineseoksen virtausta. Moottorin käydessä osakaasulla kyseisen ilmiön haittavaikutukset ovat suurimmillaan, koska uuden seoksen virtausnopeus ja liike-energia on huomattavan pieniä pakokaasun liike-energiaan verrattuna.

Pakovernttiilin sulkeutuminen vasta pakotahdin yläkuolokohdan jälkeen vaikuttaa uuden polttoaine/ilma-seoksen virtaukseen imutahdin alussa. Pakotahdin loppuvaiheilla mäntä hidastuu voimakkaasti ja lopulta pysähtyy. Tässä vaiheessa männän liike ei muodosta sylinteriin alipainetta, joka mahdollistaisi uuden seoksen virtaamisen sylinteriin. Sen sijaan pakokaasun poistuminen muodostaa pienen alipaineen sylinteriin. Mikäli imuventtiili avataan jo tässä vaiheessa, uusi seos alkaa virrata sylinteriin, vaikka varsinainen imutahti ei ole vielä alkanutkaan. Optimoimalla venttiilien yhtäaikainen aukiolo saadaan sylinterin täytösastetta nostettua ja näin ollen moottorin luovuttamaa tehoa kasvatettua. Mikäli pakovernttiili sulkeutuu kuitenkin liian myöhään, on vaarana, että uusi seos virtaa suoraan pakokanavaan, tai pakokaasu alkaa pahimmassa tilanteessa virrata takaisin sylinteriin männän liikkuessa alaspäin. (Heisler 2001, 3.)

Heislerin (2001, 8) moottoritekniikkaa käsittelevän kirjan mukaan bensiinikäyttöiselle vapaasti hengittävälle kilpamoottorille on tyypillistä noin 80°:n pituinen overlap- jakso. Kirjan esimerkkitaapauksessa imuventtiili aukeaisi 40° eykk ja sulkeutuisi 80° jälkeen alakäännekohtaan. Vastaavat arvot pakovernttiilille olisivat 80°/40°.



### 3.5 Venttiilijousen toiminta ja massavoimat

Venttiilijousien pääasiallisena tehtävänä on kehittää venttiilien sulkeutumiseen tarvittava voima ja mahdollistaa rakenteen eri osien välinen jatkuva kosketus (Autoteknillinen taskukirja 2003, 449).

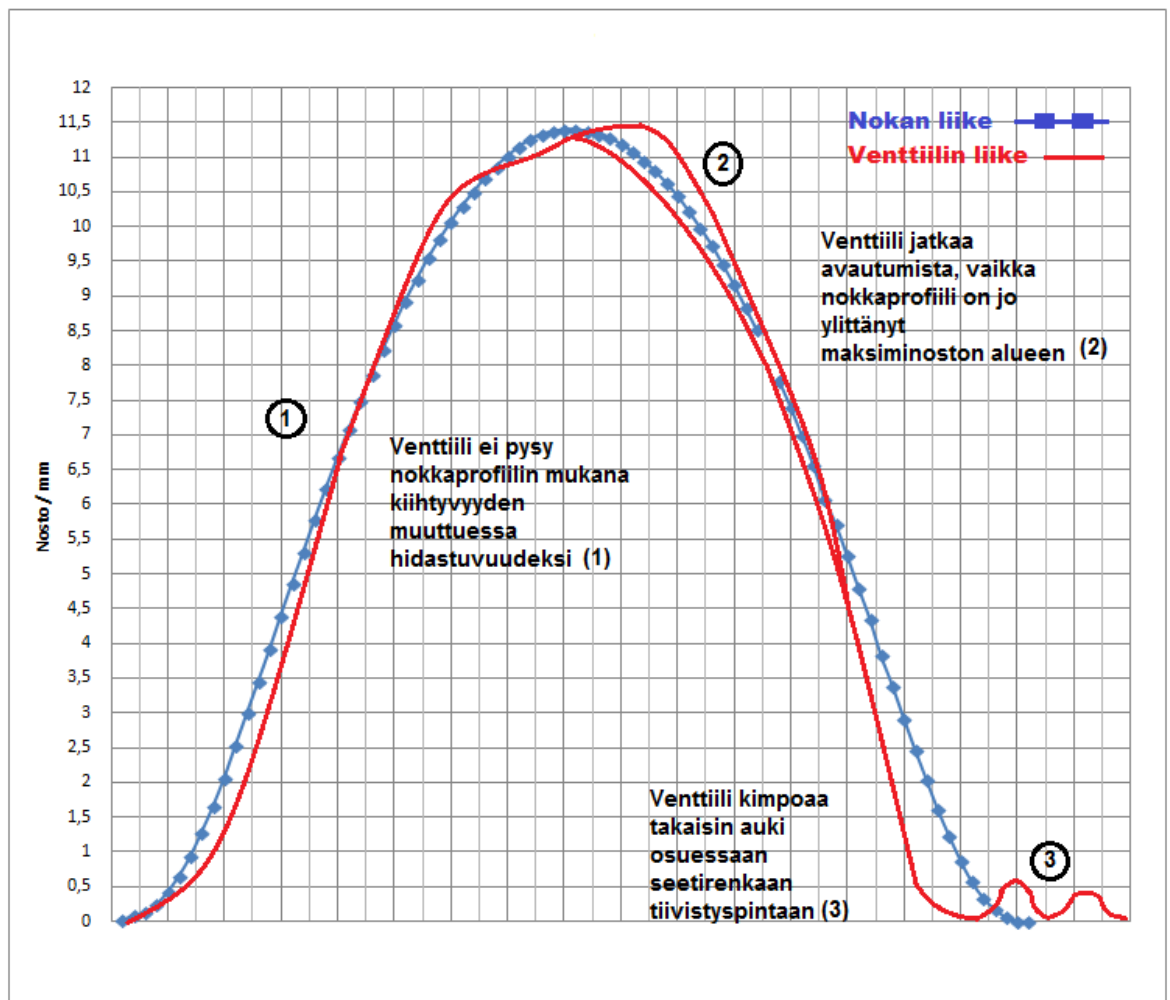
Kilpamoottoreissa moottorin käyntinopeus on yleensä huomattavan korkea ja nokkaprofiilit ovat vakiorakenteeseen verrattuna jyrkempiä. Tästä syystä johtuen kilpamoottorin venttiilikoneiston täytyy pääsääntöisesti sisältää vakiorakennetta jäykemmät venttiilijouset, jotta venttiili pystyisi seuraamaan nokkaprofiilia. Venttiilijousen tarvittava jousivoima voidaan laskea yksinkertaisesti, mikäli tiedetään venttiilin kiihtyvyyttä. (Juurikkala 1989, 231.) Liian jäykkäkään venttiilijousi ei saa olla. Ylimi-  
toitettu jousivoima voi aiheuttaa venttiilikoneiston ennenaikaista kulumista ja pahimmillaan hankaloittaa liiaksi nokka-akseleiden pyörimistä (Bell 2007, 6.8).

Venttiilikoneiston osien, kuten venttiilin, nostimen ja jousen liike aiheuttaa massavoimia. Massavoimat jaetaan positiivisiin ja negatiivisiin voimiin. Positiivisiksi voimiksi luetaan ne voimat, jotka painavat seuraajaa kohti nokka-akselia, kun taas negatiiviset voimat pyrkivät erottamaan nämä toisistaan. Venttiilikoneiston toiminnan kannalta negatiiviset massavoimat ovat kriittisempi tarkastelun kohde. Negatiiviset massavoimat pyrkivät jatkamaan venttiilin avautumaa nokan kärkialueella, vaikka nokka olisikin jo siirtynyt venttiilin sulkeutumisvaiheeseen. Tämän lisäksi kyseiset massavoimat vaikeuttavat nokkaprofiilin seuraamista venttiilin liikkeen muuttuessa kiihtyvistä hidastuvaksi. Näitä voimia voidaan rajoittaa venttiilijousen jousivoimaa kasvattamalla. Valitettavaa on kuitenkin, että jousivoiman lisäys kasvattaa positiivisten massavoimien vaikutusta lisäten venttiilikoneiston kulumista. (Heisler 2001, 37.)

Kevyen jousikuormituksen käyttö mahdollistuu, mikäli venttiilin hidastuvuus nostimen lähestyessä nokan kärkialuetta on pieni. Vastaavasti kiihtyvyyden täytyy olla matala tilanteessa, jossa venttiili aloittaa sulkeutumisen ja seuraaja ohittaa nokan kärkialueen. On kuitenkin huomioitava sekin, että kevyellä jousivoimalla venttiili saattaa sulkeutuessaan pomputa peräti kahdesti irti sylinterikannen seetirenkaasta ennen varsinaista sulkeutumistaan. (Heisler 2001, 37.) Kuviossa 3 on esitetty

venttiilin todellisen liikkeen ja teoreettisen liikkeen eroavaisuus, mikäli venttiilijousi ei pysty muodostamaan riittävän suurta jousivoimaa.

Käytössä olevan venttiilijousen jäykkyydellä on suora vaikutus nokkaprofiilin kanssa myös seuraajaan kohdistuvaan pintapaineeseen. Jäykän venttiilijousen vaikutuksesta seuraajan, kuten venttiilipainimen, pinta-paine saattaa kasvaa huomattavan isoksi. Suuren pintapaineen vaikutuksesta nokan ja venttiilipainimen välinen öljykalvo saattaa rikkoutua, jolloin toisiaan vasten liukuvat kosketuspinnat voivat kulua merkittävästi (Heisler 2001, 39).



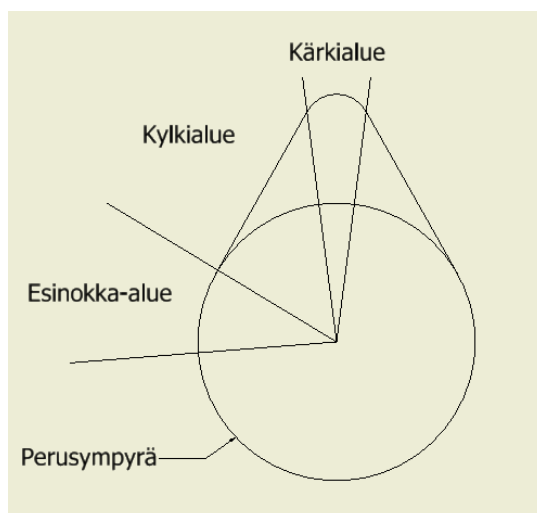
Kuvio 3. Alimitoitettun venttiilijousen vaikutukset (Heisler 2001, 40).

## 4 NOKKA-AKSELI

Nokka-akseli muodostuu pääasiassa neljästä eri osuudesta: perusympyrästä, esinokka-alueesta, kylkialueesta ja kärkialueesta (kuvio 4). Nokan perusympyrällä on sama keskipiste kuin koko nokka-akselin poikkileikkauksella. Venttiili on kiinni, kun seuraaja on perusympyrän kohdalla.

Esinokka-alueen tarkoituksena on poistaa nokan ja seuraajan välinen välitys jouheasti ja aloittaa venttiilin avautuminen hallitulla kiihtyvyydellä. Kilpamoottoreissa esinokka-alue on yleensä lyhyempi kuin siviilikäyttöön tarkoitetuissa nokka-akseleissa. Lyhyen esinokka-alueen ansiosta nokan kylki- ja kärkialueen pituus voi olla suurempi.

Varsinainen venttiilin avaaminen tapahtuu kylkialueella. Tällöin venttiilin avautumisnopeus on huomattavasti suurempi kuin esinokka-alueella. Kylkialueen muoto vaihtelee merkittävästi käytössä olevasta profiilista riippuen. Kärkialueella venttiilin avautuma saa maksimiarvonsa. Venttiilin avautumisnopeus vähenee kärkialueella, kunnes venttiilin liike hetkellisesti pysähtyy. Venttiilin sulkeutumisvaiheessa seuraaja käy läpi edellä mainitut vaiheet päinvastaisessa järjestyksessä. (Bell 2007, 5.4.)



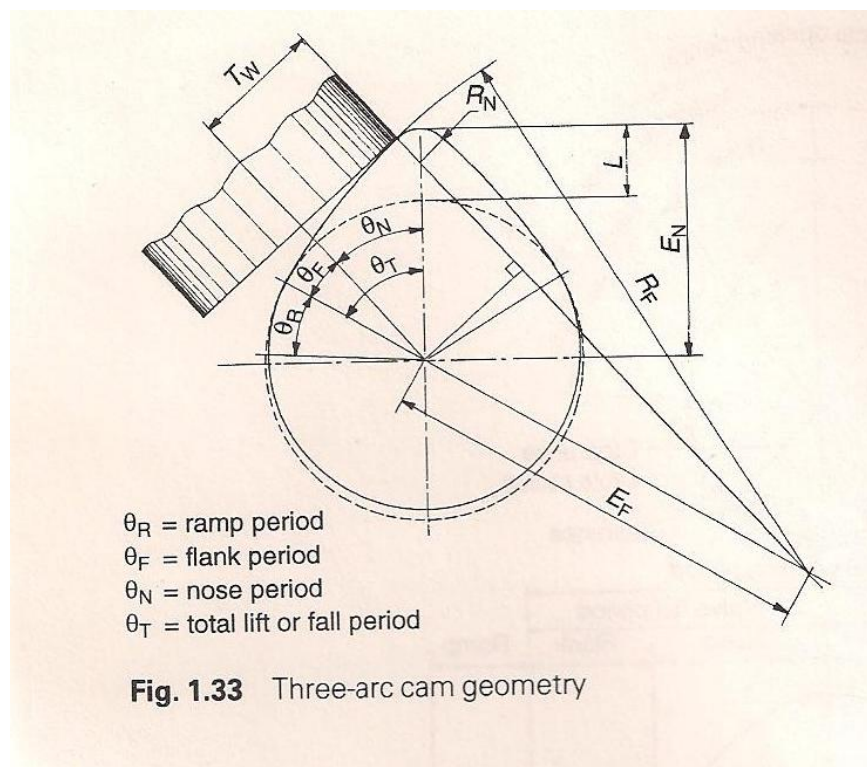
Kuvio 4. Nokkaprofiilin osa-alueet.

## 4.1 Profiili

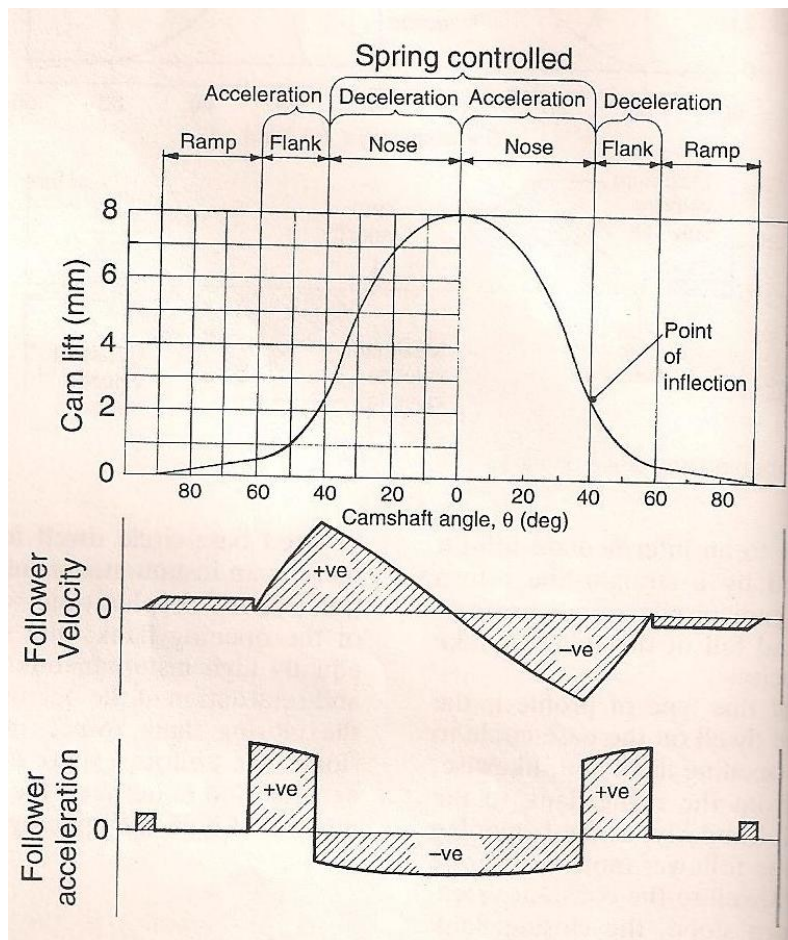
Nokka-akselin nokkaprofiili vaikuttaa suoraan seuraajan nopeuteen ja kiihtyvyyteen. Uuden nokkaprofiilin suunnitteluvaiheessa huomataan myös, että profiililla voidaan vaikuttaa hyvin paljon sylinteritäytökseen ja kaasunvaihtotapahtumaan. Seuraavassa on esitetty erilaisia yleisiä nokkaprofiileja.

### 4.1.1 Kolmikaariprofiili

Yksinkertaisin nokka-akseliprofiili koostuu perusympyrästä ja pienestä kärkiympyrästä sekä näitä yhdistävistä samanlaisista kyljistä. Kuviossa 5 on esitetty kyseisen profiilin geometrian muodostus. Nokan kylkialueen säteen ja maksiminoston välinen suhde pitäisi olla väliltä 2–3. Tämä mahdollistaa järkevän kompromissin seuraajan kiihtyvyyksissä nokan kylkialueella sekä venttiilijousen toiminnassa nokan kärkialueella. Tällä profiililla seuraajaan aiheutuu nokan avautumisvaiheessa ja juuri ennen perusympyrälle palaamista suuria kiihtyvyyksiä, koska niin sanottua esinokka-aluetta ei ole välttämättä käytössä. (Heisler 2001, 26.)



Kuvio 5. Kolmikaariprofiili (Heisler 2001,28).



Kuvio 6. Kolmikaariprofiilin ominaisuudet (Heisler 2001, 28).

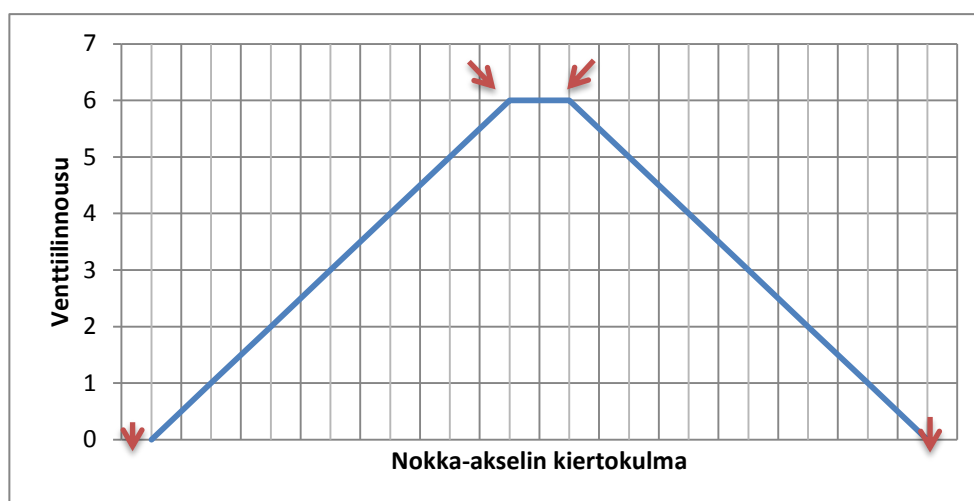
Kyseisen nokkaprofiilin nostokuvaaja sekä seuraajan, kuten esimerkiksi paininkupin nopeus- ja kiihtyvyysskuvaajat ovat esitetty kuviossa 6. Nostokuvaaja on symmetrinen. Avautumis- ja sulkeutumispuolen samassa kohdassa on niin sanottu käännepiste (Point of inflection), jossa seuraajan nopeus on suurimmillaan. Samassa pisteessä kiihtyvyys vaihtaa suuntaansa. Näiden pisteiden välillä nopeus muuttuu melko tasaisesti kiihtyvyyden ollessa lähes vakio.

#### 4.1.2 Tasanopeus-profiili

Niin sanotussa tasanopeus-profiilissa nokan kylkialueet ovat täysin suorat. Tämnäkaltaisessa nokkaprofiilissa sekä avautumis- että sulkeutumisvaihe muodostavat seuraajalle täysin lineaarisen liikkeen nopeuden pysyessä vakiona. Suurin ongelma tässä profiilissa syntyy äkkinäisistä profiilin muutoksista siirryttäessä perusympyrältä kylkialueelle tai kylkialueelta lähes tasaiselle kärkialueelle. Venttiilin sulkeutumisvaiheessa samat ongelmat toistuvat, mutta vain päinvastaisessa järjestyksessä. (Heisler 2001, 27.)

Profiilin nopeat muutokset aiheuttavat suuren kiihtyvyyden myötä seuraajaan kohdistuvia voimia, jotka kuluttavat tätä jo pienilläkin moottorin käyntinopeuksilla. Rakente tekee myös venttiilikoneistosta kovaäänisen. Jotta venttiili pystyisi seuraamaan profiilin nopeita muutoksia, venttiilijousen täytyy olla huomattavan jäykkä. (Heisler 2001, 28)

Nokkaprofiilikuvaaja on kuvion 7 periaatekuvaajan kaltainen. Venttiilinousu kasvaa tasaisesti nokan kiertyessä ja nokan kärkialue on ainakin periaatteessa tasainen. Kuvioon on merkitty punaisiin nuolin kohdat, joissa profiilin suurimmat edellä mainitut ongelmat esiintyvät. Tällöin seuraajaan ja venttiiliin aiheutuvat erittäin suuret kiihtyvyydet syntyvät. Nuolten välisillä alueilla seuraajan nopeuskuvaajasta muodostuisi vaakasuuntaisen x-akselin suuntainen suora, jolloin kiihtyvyyttä ei esiinny.

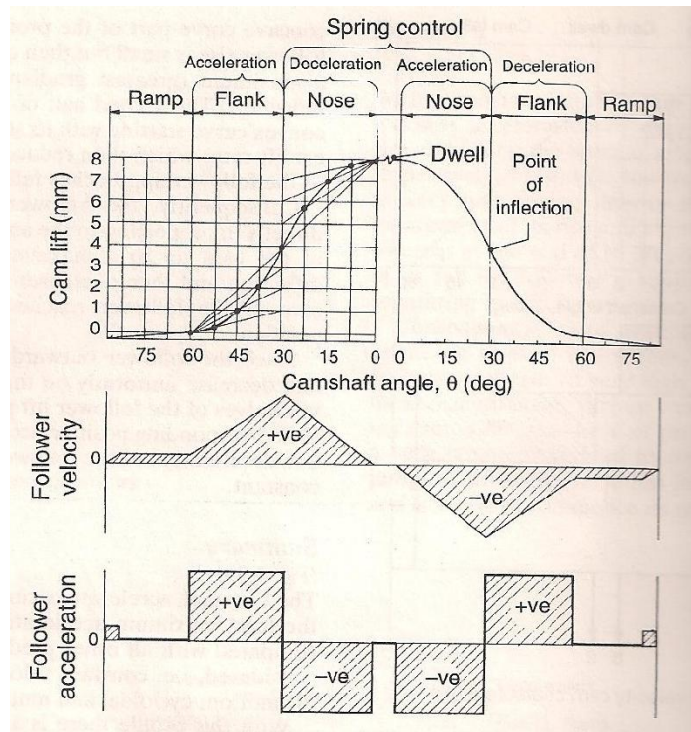


Kuvio 7. Tasanopeusprofiili.

### 4.1.3 Parabolinen profiili

Parabolinen profiili tarkoittaa nokan kylkialueen muodostumista kahdesta paraabelin osasta. Venttiilinoston kuvaaja on pienillä venttiilin aukeamisilla hieman kovera, mutta muuttuu kuperaksi venttiilin aukeaman puolivälin lähetyvillä. Tässä pisteessä nokkaprofiilin jyrkkyys muuttuu jyrkästä hieman loivemmaksi. Kyseisen profiilin ansiosta venttiilin ja nostimen maksimikihtyvyyden on pienempi muihin profiileihin nähden. Keskivaiheilla tapahtuvan jyrkkyyden muutoksen vuoksi rakenne vaatii kuitenkin jäykän venttiilijousen estämään venttiilikoneiston sekoamisen korkeilla käyntinopeuksilla. Kuten kuviossa 8 on esitetty, tässä kohtaa profiilin aiheuttama kiihtyvyyden muutos on suurimmillaan. Tätä nokkaprofiilia kuvaa hyvin seuraajan vakio kiihtyvyyden eri profiilin alueilla. (Heisler 2001, 29.)

Seuraajan saavutettua huippunopeuden sen kiihtyvyyden muuttuu nopeasti positiivisesta negatiiviseksi (Point of inflection). Tästä ominaisuudesta johtuen profiili ei ole paras mahdollinen korkean käyntinopeuden omaavissa moottoreissa. (Moon 1961, D-1.)



Kuvio 8. Paraboloidisen profiilin ominaisuudet (Heisler 2001, 30).

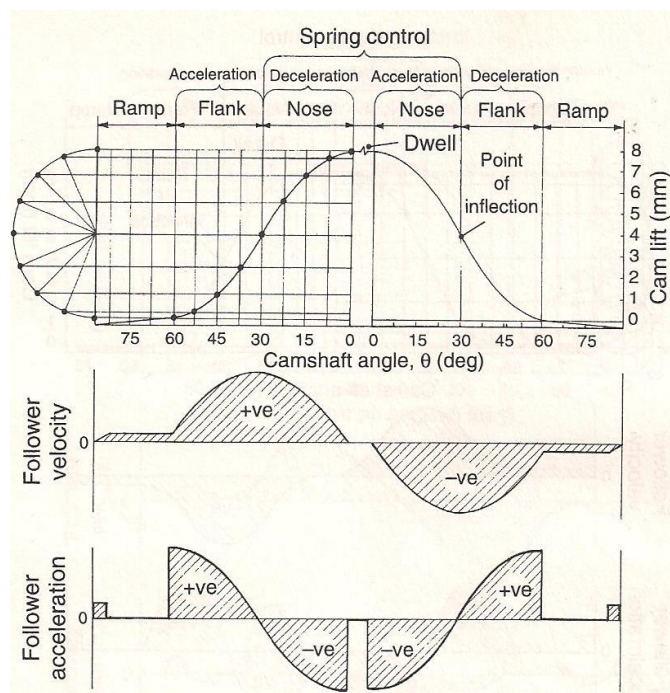


#### 4.1.4 SHM-profiili

Simple harmonic motion -profiilin nokka-akseli muodostaa venttiilin nopeuskuvasta jouhean, sinikäyrää muistuttavan. Venttiilin avautuu aluksi nopeasti, mutta avautumisnopeus hidastuu jouheasti lähestyttäessä kärkialuetta. Lopulta nokan kärkialueella seuraajan nopeus on nollassa. Sulkeutuminen tapahtuu päinvastaisesti. Kyseinen profiili mahdollistaa melko pienen jousivoiman käytön, koska siirtyminen nokan kylkialueelta kärkeen tapahtuu jouheasti. Suurin vaatimus venttiilijouselle syntyy perusympyrän ja kylkialueen yhdistymiskohdassa venttiilin avautumis- että sulkeutumisvaiheessa. (Heisler 2001, 31.)

Kuvion 9 nopeus- ja kiihtyvyysskuvaaajista näkee selvästi profiilille ominaisen jouheuden. Nopeita seuraajan kiihtyvyyden muutoksia tulee yhden kierroksen aikana neljästi, kun esimerkiksi edellä kuvailtu parabolinen profiili aiheuttaa kuusi kiihtyvyyden muutosta. Kyseinen ominaisuus selittää osaltaan mahdollisuuden pienemmän jousikuorman käyttöön venttiilijousessa.

Suurin korkea käyntinopeutta rajoittava tekijä on profiilin kärjessä oleva tasainen alue, joka aiheuttaa nopean seuraajan kiihtyvyyden muutoksen. Muilta osin kiihtyvyysskuvaaajasta tulee tätä profiilia käyttäen jouhea. (Moon 1961, D-2.)



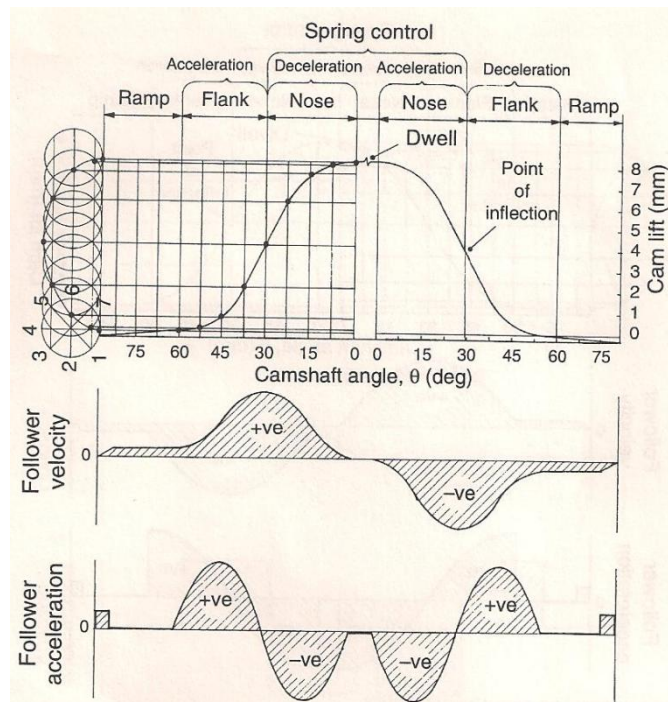
Kuvio 9. SHM-profiili (Heisler, 2001, 31).



#### 4.1.5 Syklodi-profiili

Syklodiselle profiilille on tunnusmaisinta venttiilin avautumisen hitaus noston alkuvaiheessa, kuten myös sulkeutumisen hitaus venttiilin ollessa enää vain vähän auki. Tämän vuoksi nostimeen ja venttiiliin kohdistuva dynaaminen kuormitus on näillä hetkillä pieni, mikä mahdollistaa pienemmän jousivoiman käytön venttiilijoussa. Venttiilin avautumisnopeus siirryttäessä perusympyrältä varsinaiselle kylki-alueelle on erittäin hidas. Jotta kyseinen ominaisuus toimisi tarkoituksenmukaisesti, tämän profiilin yhteydessä tulisi käyttää seuraajaa, joka toimii mahdollisimman pienellä välyksellä. Tällaiselle profiilille on tunnusomaista venttiilin pitkä aukioloaika maksiminoston aikana. Seuraajan kiihtyvyytkuvaajan jouhea muoto (kuvio 10) aiheuttaa vain pieniä kuormituksia. Seuraajaan kohdistuvien kuormitusten ollessa suhteellisen pieniä, venttiilin oikeanlainen liike voidaan mahdollistaa kevyellä jousivoimalla. (Heisler 2001, 33.)

Profiili ei aiheuta äkkinäisiä kiihtyvyyden muutoksia, jolloin venttiilikoneiston kuormitus jää matalammaksi kuin muita perusprofiileja käyttäessä. Tästä syystä johtuen syklodi-profiili on käyttökelpoinen, mikäli moottorin käyntinopeusalue on korkea. (Moon 1961, D-2.)

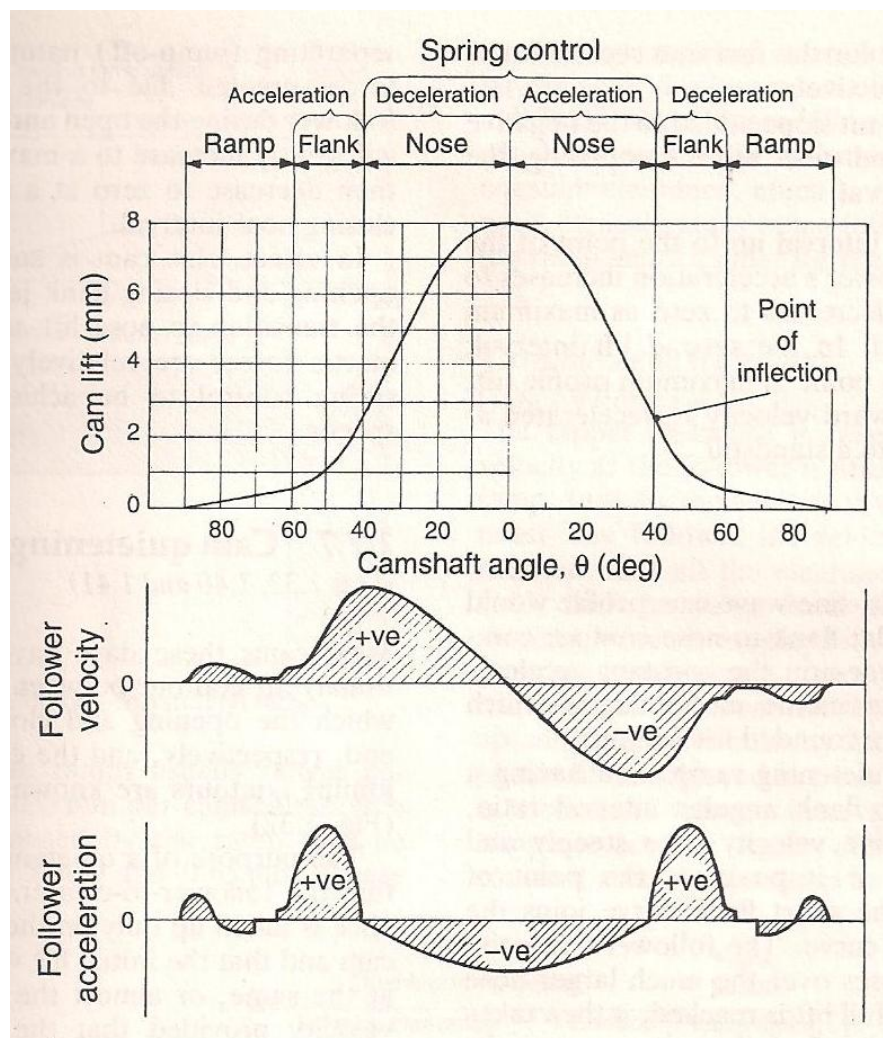


Kuvio 10. Syklodi-profiili (Heisler 2001, 32).

#### 4.1.6 Multi-sine-wave -profiili

Kyseinen nokkaprofiili muodostuu pienillä venttiilinnousuilla selvästi koveran muotoisesta osuudesta, jonka aikana seuraaja saavuttaa maksiminopeuden. Tämän osuuden jälkeen profiilikuvaaja on hieman kupera päättyen venttiin maksiminou-suun. Profiilikuvaajan kovera osuus on huomattavasti lyhyempi kuin kupera vaihe. Kuten kuvioista 11 nähdään, profiilin muuttumispisteessä (Point of inflection) seuraaja saavuttaa huippunopeutensa.

Nokkaprofiilin tarkka muoto syntyy tietyn sinifunktion avulla. Kyseistä profiilia käyttämällä venttiili pysyy hyvin nokka-akselin liikkeen mukana, vaikka moottoria käytettäisiin korkealla käyntinopeudella. Tämä johtuu seuraajaan kohdistuvista matalammista kuormituksista. (Heisler 2001, 34.)



Kuvio 11. Multi-sine-wave -profiili (Heisler 2001, 33).

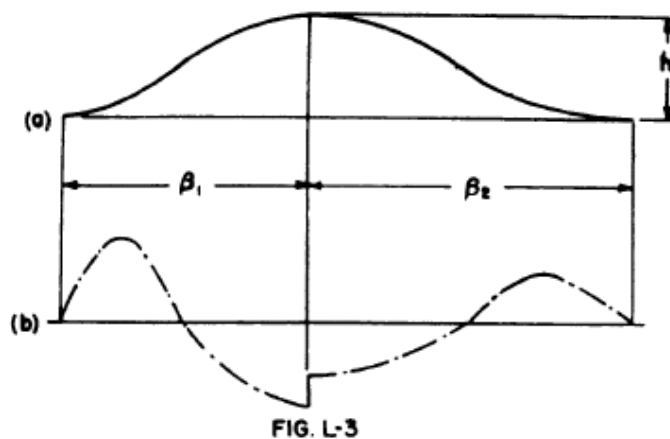
#### 4.1.7 Profiilin merkitys

Edellä esitettyjen nokka-profiilien lisäksi profiilin voi valmistaa jonkin muunkin geometrian tai matemaattisen kaavan pohjalta. Nokkaprofiili voi olla myös yhdistelmä erilaisista profiileista.

Kaikkia profiileja yhdistää kuitenkin samat vaatimukset. Venttiilin tulee pystyä seuraamaan profiilin muotoa ja seuraajaan ei saa kohdistua kuormituksia mitkä voisivat rikkoa sen. Vaikka profiili olisikin esimerkiksi sylinterikannen virtausten kannalta ihanteellinen, ei siitä ole hyötyä, mikäli venttiilikoneisto hajoaa ennen aikojaan.

Esimerkkiprofiilit ovat kaikki symmetrisiä. Tällöin venttiilin avautumis- ja sulkeutumisjakso ovat toistensa peilikuvia. Kokemuseräisesti joissain kilpamoottoreissa on havaittu kuitenkin olevan eduksi käyttää epäsymmetristä profiilia. Tällöin venttiilin avautumis- ja sulkeutumisvaiheet ovat eripituisia.

Epäsymmetrisessä profiilissa törmää kuitenkin helposti ongelmaan venttiilin maksiminoston alueella, jolloin profiilin muoto vaihtuu. Tässä tilanteessa kiihtyvyysskuaajaan muodostuu kuviossa 12 esitetty nopea kiihtyvyyden muutos, mikä tulisi pitää mahdollisimman pienenä. (Moon 1961, L-1.)

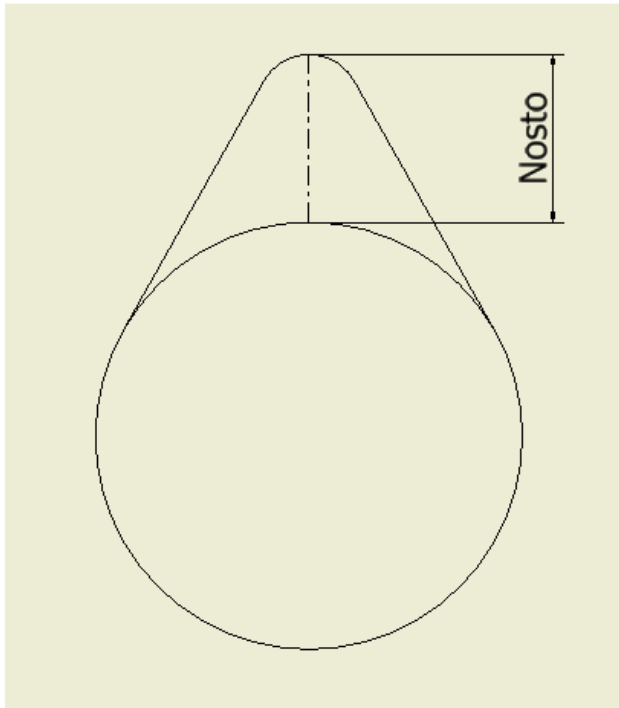


Kuvio 12. Epäsymmetrinen nokkaprofiili (Moon 1961, L-2).

## 4.2 Nosto

Nokka-akselin nostolla tarkoitetaan perusympyrän ja nokan huipun välistä koh-tisuoraa etäisyyttä (kuvio 13). Tämä ominaisuus määrää venttiilin maksimiau-keaman, mikäli venttiilikoneisto toimii suoralla paininohjauksella. Keinuvivuilla va-rustetussa sylinterikannessa venttiilinaukeamaan vaikuttaa myös keinuvivun laa-kerointipisteen ja paininpään välinen etäisyys.

Voisi kuvitella, että mitä suurempi nosto on, sitä suuremmaksi sylinterin täytösaste saadaan yhden työkierron aikana. Näin ei kuitenkaan aina ole, kuten tämän työn seuraavassa osiossa tullaan huomaamaan. Suuri nosto aiheuttaa myös ongelmia venttiilin ja männän välisessä liikkeessä. Suurinostoinen nokka aiheuttaa hyvin todennäköisesti venttiilin ja männän välisen liian pienen etäisyyden, jolloin huomattavan moottorivaurion riski kasvaa. Kokemuspohjaisesti mäntiin joutuukin usein tekemään lisätilaa venttiileitä varten, mutta liiallinen mäntien koneistaminen saattaa heikentää männän rakennetta huomattavasti.

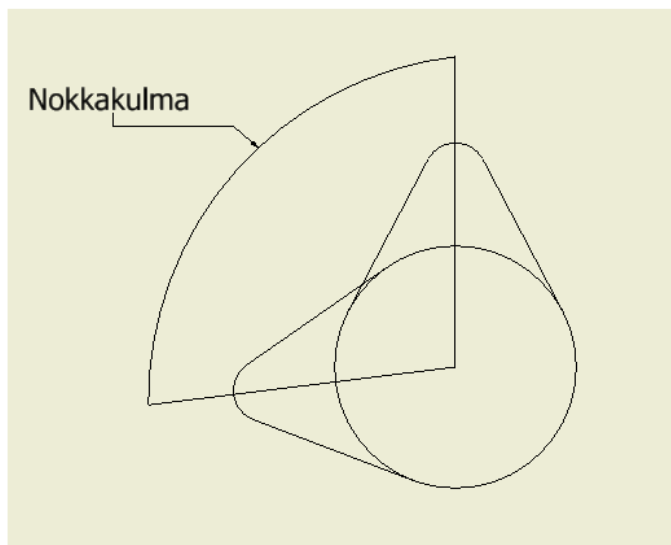


Kuvio 13. Nosto.

### 4.3 Nokkakulma

Imu- ja pakonokka-akselin nokkien välistä kulmaa kutsutaan nokkakulmaksi (kuvio 14). Tämä arvo määrää imu- ja pakoventtiilien avautumis- ja sulkeutumisasajankohdan toisiinsa nähden. Esimerkiksi, jos imuventtiilin suurin nosto tapahtuu  $120^\circ$  JYKK ja pakoventtiili on kokonaan avautuneena  $80^\circ$  EYKK, niin nokkakulma olisi arvoltaan  $100$  astetta ( $(120^\circ + 80^\circ) / 2 = 100^\circ$ ).

Nokka-kulman suurin merkitys on sen suora vaikutus overlap-jakson pituuteen. Suuremmalla nokkakulmalla venttiilien overlap-jaksosta tulee lyhyempi kuin vastaavalla pienemmän nokkakulman omaavalla akselilla. Monesti pienempi nokkakulma johtaa keskialueen käyttötehon kasvuun ja teoriassa suuri nokkakulma parantaa moottorin suorituskykyä kierrosalueen yläpäässä. (Bell 1998, 54, 61.)



Kuvio 14. Nokkakulma (yksinokkainen rakenne).

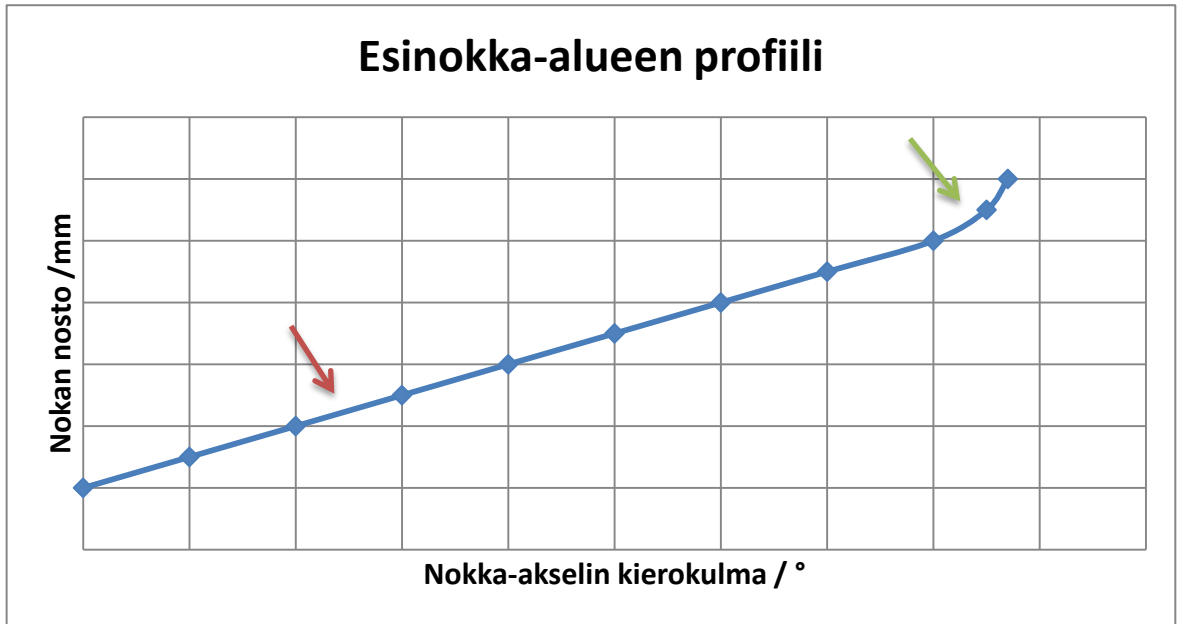
#### 4.4 Esinokka-alue

Yksinkertaisin esinokka-alue, jota myös nokan rampiksi voidaan kutsua muodostuu tasaisesta kaariprofiilista. Tällöin venttiiliväläyksen pieneneminen ja venttiilin avautumisen alkuhetket tapahtuvat tasaisella nopeudella. Tässä rakenteessa rampin nousu on yleensä noin 0,0125-0,035 mm yhtä nokka-akselin astetta kohden. Esinokka-alueen pituus vaihtelee tällöin 20–50 nokka-akselin asteen välillä. (Heisler 2001, 35.)

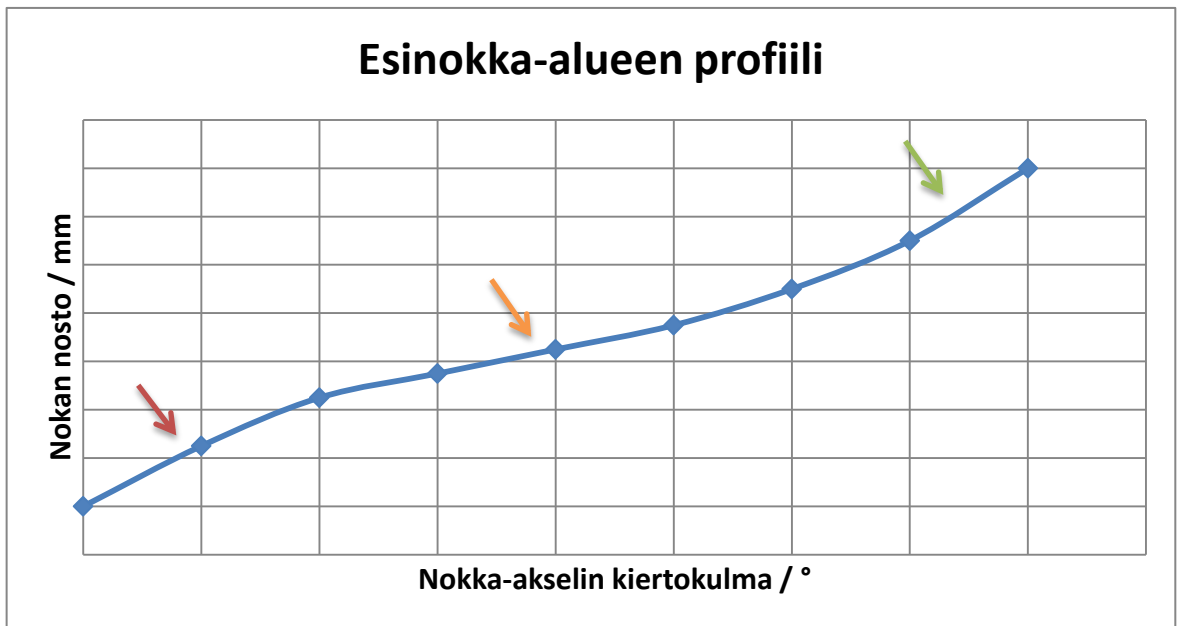
Nokan ramppi voi muodostua myös useammasta osiosta. Niin sanotussa muuttuvanopeuksisessa rampissa alkuosa poistaa venttiiliväläyksen nopeasti, mutta venttiilin avautumien tapahtuu huomattavasti hitaammin. Tällaisella esinokka-alueella venttiilin avautumisen ensimmäiset millimetrin kymmenykset voivat tapahtua peräti vain 1/3 nopeudella perinteiseen ramppiin nähden. (Heisler 2001,35.)

Kilpamoottorin nokka-akselissa esinokka alueen pituus täytyy olla lyhyempi ja jyrkempi, kuin vastaavassa siviililiikenteeseen tarkoitettussa moottorissa. Mikäli venttiiliväläys olisi 0,30 mm ja rampin avautumisnopeus 0,0125 mm/°, muodostuisi esinokka-alueesta 24:n nokka-akselin asteen pituinen. Heislerin ohjearvojen toinen ääripää (0,035 mm/°) on sen sijaan lähempänä kilpamoottorin esinokka-alueen pituutta, mikäli ramppi muodostuu vain yhdestä kaaresta.

Kuviossa 15 ja 16 on esitetty graafisesti yksiosainen ja kaksiosainen esinokka-alue. Kuvion 15 punaisen nuolen osoittama lineaarinen suora kuvaa esinokka-alueen jyrkkyyttä ja vihreä nuoli nokan kylkialueen alkamiskohtaa. Kuviossa 16 punainen nuoli osoittaa esinokka-alueen alkuosaa, jolloin venttiiliväläys poistetaan nopeasti. Ramppi jatkuu oranssin nuolen osoittamaan alueeseen, jolloin itse venttiilin avaaminen aloitetaan. Lopulta esinokka-alue loppuu ja seuraaja on vihreän nuolen osoittaman kylkialueen alkuosan kohdalla.



Kuvio 15. Yksinkertainen ramppi.

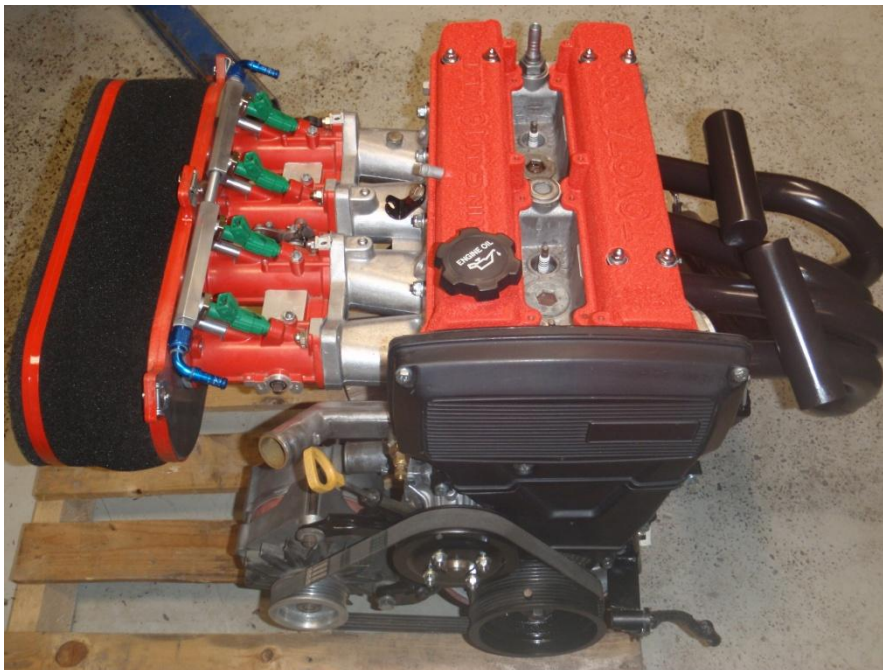


Kuvio 16. Kaksivaiheinen ramppi.

## 5 SUUNNITTELUN KOHDE

Tässä opinnäytetyössä kohdemoottorina toimii kuviossa 17 oleva Toyotan 16-venttiilinen 4A-GE- moottori. Kyseinen moottori tunnetaan parhaiten Toyota Corolla AE86 GT:n voimanlähteenä. Moottori on perinteinen nelisylinterinen bensiinikäyttöinen rivimoottori, joka on varustettu kahdella kannen yläpuolisella nokka-akselilla. 4A-GE edustaa melko vanhaa 80-luvun tekniikkaa, mutta moottorityyppi on hyvin yleinen viritysaihio nykypäivän autourheilussa.

Työssä käytetyn moottorin viritystasetta on kohotettu huomattavasti alkuperäisestä, sillä moottori on tarkoitettu rallikäyttöön. Viritystasteen noston vuoksi sylinterikansi on huomattavasti vakiota suorituskykyisempi. Kansi sisältää kilpakäyttöön tarkoitettut venttiilit ja venttiilijouset, imu- ja pakokanavia on muotoiltu ja nokka-akselit ovat suunniteltu rallikäyttöön. Moottoriin on myös asennettu Jenveyn 45 mm:n läppärungot ja paremmin virtaava pakosarja. Kyseinen moottori luovuttaa liitteen 1 tehomittaustodistuksen mukaan 219 hevosvoiman maksimitehon ja 201 Nm:n maksimiväännön.



Kuvio 17. Kohdemoottori, Toyota 4A-GE.



## 5.1 Venttiilikoneisto

4A-GE:n venttiilikoneisto on yksinkertainen. Sylinterikannessa on suora paininkuppiohjaus. Nokka-akseli painaa alapuolista paininkuppia, josta liike välittyy suoraan venttiin. Rakenne on kaikin puolin mekaaninen, sillä venttiilinsäätö tapahtuu paininkupin ja venttiin välissä olevilla pienillä säätöpaloilla eikä hydraulisesti, kuten monissa tapauksissa. Hammashihnavetoiset nokka-akselit on kiinnitetty viidellä laakerointipukilla alumiiniseen sylinterikanteen (kuvio 18).



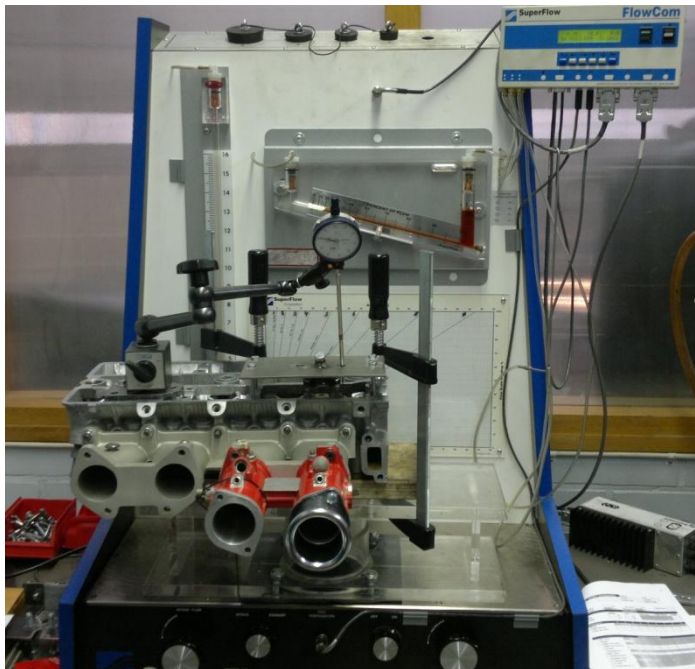
Kuvio 18. 4A-GE:n venttiilikoneisto.

## 5.2 Sylinterikannen virtausominaisuudet

Tieto sylinterikannen kanavien virtausominaisuuksista auttaa huomattavan paljon nokka-akselin suunnittelutyötä. Virtausominaisuuksien perusteella voi tehdä päätelmiä siitä, millainen nokka-akselin profiiliin tulisi olla, jotta sylinteritäytös saataisiin mahdollisimman suureksi.

Kohdemootorin sylinterikannen imupuolen virtausominaisuudet mitattiin kuviossa 19 olevalla Seinäjoen ammattikorkeakoulun SuperFlow-virtauspenkillä. Kyseinen virtauspenkki on Amerikkalaisen Flowcomin valmistama ja sisältää lisävarusteena asennetun digitaalisen laskenta/näyttöpäätteen.

Mittausta varten sylinterikanteen on asennettu mekanismi, jolla yhden sylinterin molempia imuventtiileitä pystytään avaamaan yhtäaikaisesti. Venttiilien aukeama mitattiin mittakellolla venttiilijousen jousilautasesta. Pakoventtiilien ja sytytystulpan tulee olla tietenkin kiinnitettyinä, jotta tuloksia vääristäviltä ohivuodoilta vältyttäisiin. Mittausten aikana sylinterikannessa oli kiinnitettyinä myös imusarja, läppärungot sekä imutorvi, jotta tilanne vastaisi mahdollisimman paljon todellisuutta.



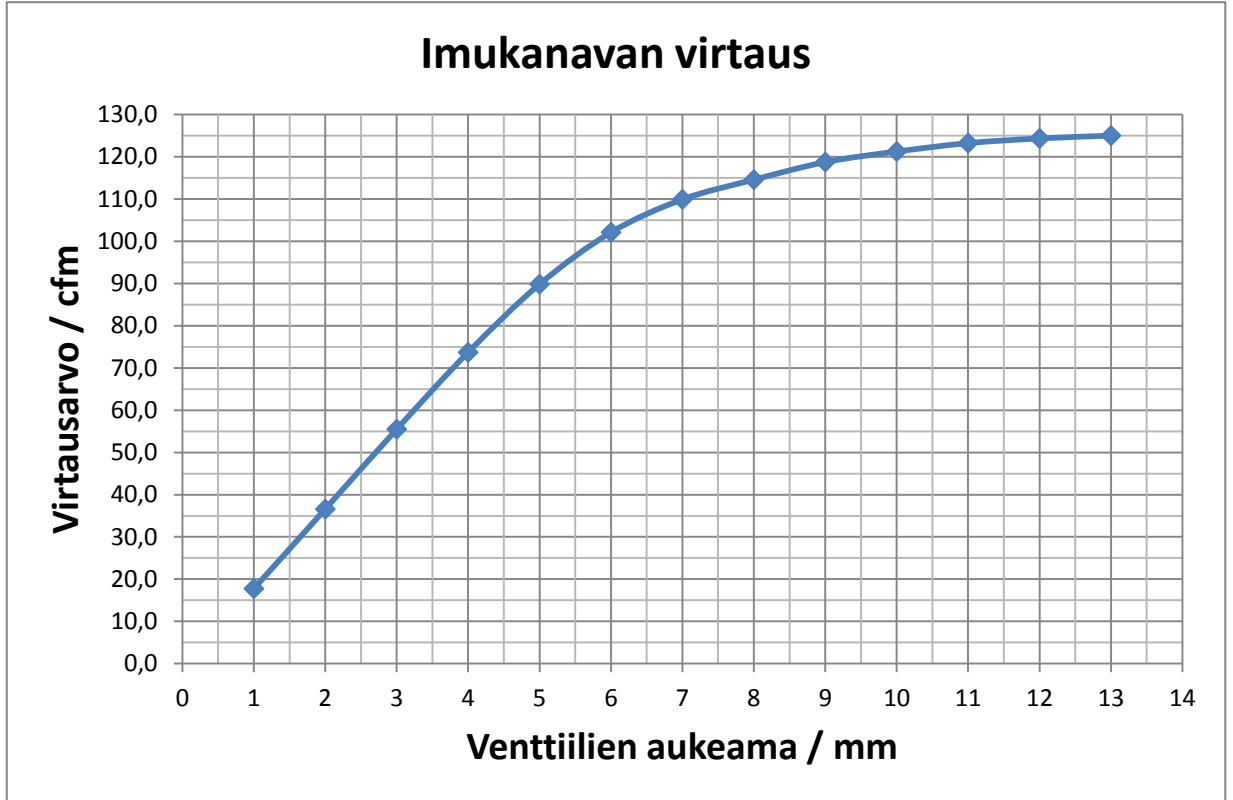
Kuvio 19. Sylinterikannen virtausmittaus.

Mittaus toistettiin kolme kertaa, jotta tulosten luotettavuus varmistuisi. Kaksi mittausta suoritettiin lisäämällä venttiilien aukeamaa millimetri kerrallaan ja yksi mittaus tehtiin puolen millimetrin välein. Kaikkien mittausten tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan, joten näitä voidaan pitää luotettavina. Mittauksissa saadut tulokset sekä näistä lasketut keskiarvot on esitetty taulukossa 1. Virtausmittauksissa laitteen valmistusmaasta johtuen on virtauksen yksikkö cfm, eli kuutiojalkaa minuutissa. Yksi cfm vastaa noin 0,4719 litraa sekunnissa. Flowcomin Excel-pohjainen mittauspöytäkirja on liitteenä työn loppuosassa (liite 2).

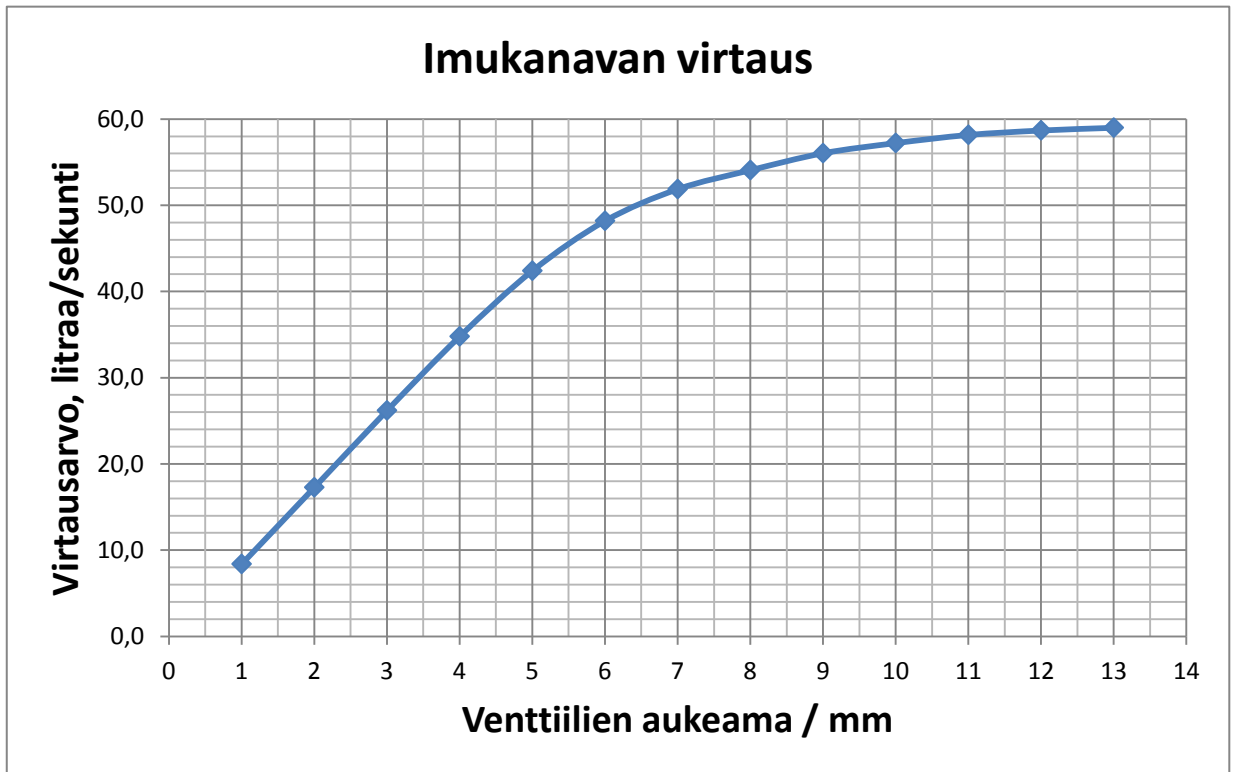
Taulukko 1. Imukanavan virtausominaisuudet.

	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Keskiarvovirtaus	Keskiarvovirtaus
Venttiilin nousu / mm	virtaus / cmf	virtaus / cmf	virtaus/cmf	cmf	litraa/ sekunti
1	17,8	17,8	17,7	17,8	8,4
2	36,6	36,6	36,6	36,6	17,3
3	55,7	55,6	55,2	55,5	26,2
4	73,6	74,2	73,3	73,7	34,8
5	89,8	90,2	89,5	89,8	42,4
6	102,5	102,8	101	102,1	48,2
7	109,7	110	110	109,9	51,9
8	114,2	115	114,5	114,6	54,1
9	118,5	119	118,7	118,7	56,0
10	121,5	122	120,2	121,2	57,2
11	124	123,5	122,2	123,2	58,2
12	124,5	125	123,5	124,3	58,7
13	125	125	125	125	59,0

Taulukon perusteella laaditusta virtauksen keskiarvokuvaajista (Kuvio 20 ja 21) näkee selvästi virtauksen käyttäytymisen. Kuuden millimetrin venttiiliaukeamaan asti kanavan virtauskapasiteetti nousee lineaarisesti ja melko jyrkästi. Tämän jälkeen virtaus ei enää kasva yhtä jyrkästi, vaikka venttiilien aukeamaa lisättäisiinkin. Noin 11 mm venttiiliaukeaman jälkeen kanavan virtaus ei juuri enää kasva. Mittausten huippuvirtaus 125 cfm saadaan 13 mm venttiilien aukeamalla, mutta 11 millimetrissä arvo on vain 1,8 cfm pienempi.



Kuvio 20. Imukanavan virtauskuvaaja [cfm].



Kuvio 21. Imukanavan virtauskuvaaja [l/s].

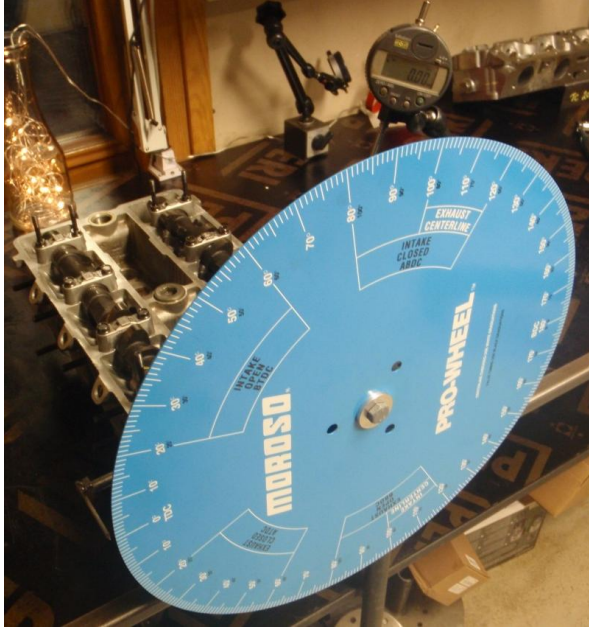
## 6 VERTAILUAKSELIT

Tutkimuskohteena olevan moottorin vanhoja nokka-akseleita tutkittiin määrittämällä sekä imu- että pakonokka-akselista profiili-, nopeus- ja kiihtyvyytkuvaaja. Näitä tietoja voidaan käyttää myöhemmin hyödyksi pohdittaessa uudenlaista ratkaisua imunokka-akseliksi.

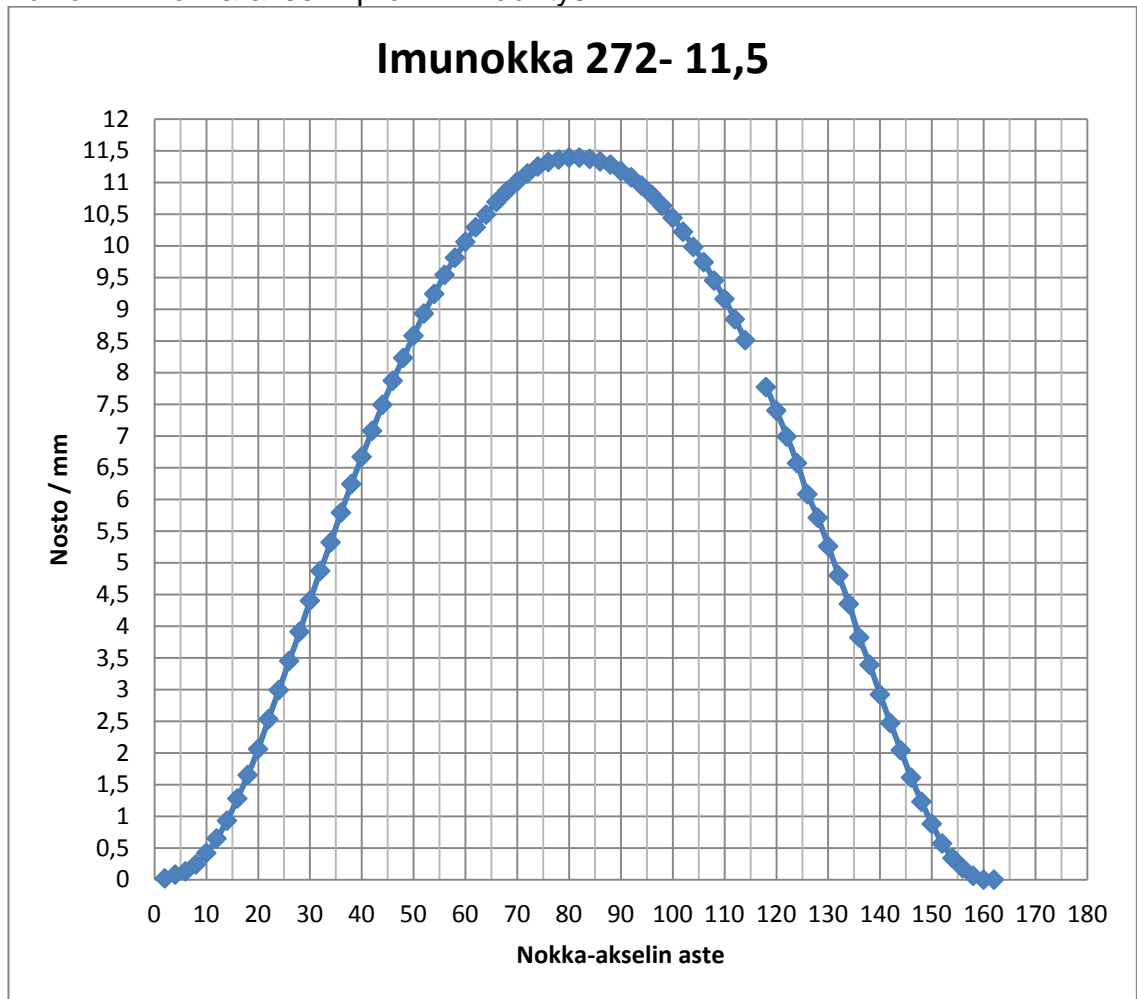
### 6.1 Imunokka-akseli

Työssä käytetyssä moottorissa oli kiinni käytännössä hyväksi havaitut Speedfactorin nokka-akselit. Imupuolella nokka-akseli on ilmoitettu olevan 272-asteinen ja 11,5 mm maksiminoston omaava. Kyseisessä akselissa astemäärä on ilmoitettu millistä milliin arvona ja 0,25 mm:n suositeltu venttiilivällys on otettu myös huomioon. Mittausten mukaan venttiilin aukioloaika on noin 316 astetta, mikäli tarkastellaan todellista tilannetta venttiilin aukeamishetkestä sen sulkeutumiseen.

Malliakseleita koskevat kuvaajat on laadittu mittausten perusteella, joissa nokka-akselia on käännetty kaksi astetta kerrallaan samalla venttiilin aukeamaa mitaten (kuvio 22). Kuviossa 23 on esitetty nokka-akselin profiili eli nokan kiertokulma venttiilin avautuman funktiona. Kuten kuvaajasta huomaa, nokkaprofiili on mittauksien tarkkuuden rajoissa symmetrinen. Mittauksen mukaan venttiilin maksimousu on 11,4mm, mutta tämä 0,1 mm:n poikkeama voidaan lukea mittavirheeksi.



Kuvio 22. Nokka-akselin profiilin määrittäminen.



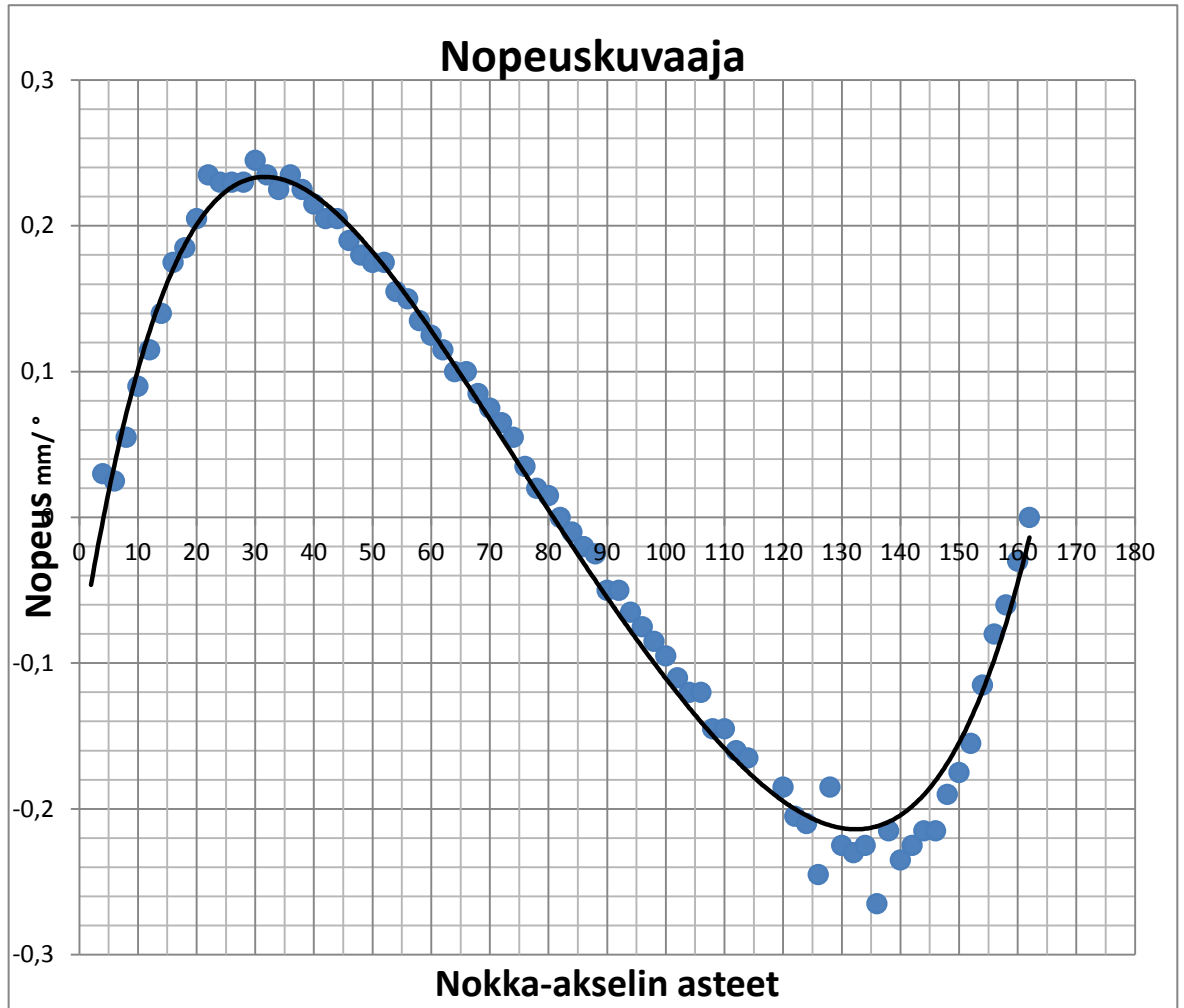
Kuvio 23. Imunokka-akselin profiilikuvaaja.

Profiilikuvaajan lisäksi nokka-akselista voidaan piirtää myös nopeus- ja kiihtyvyysskuvaajat suoritettujen mittausten perusteella. Nämäkään kuvaajat eivät ole verrannollisia moottorin pyörimisnopeuteen, vaan pelkästään nokka-akselin geometriaan.

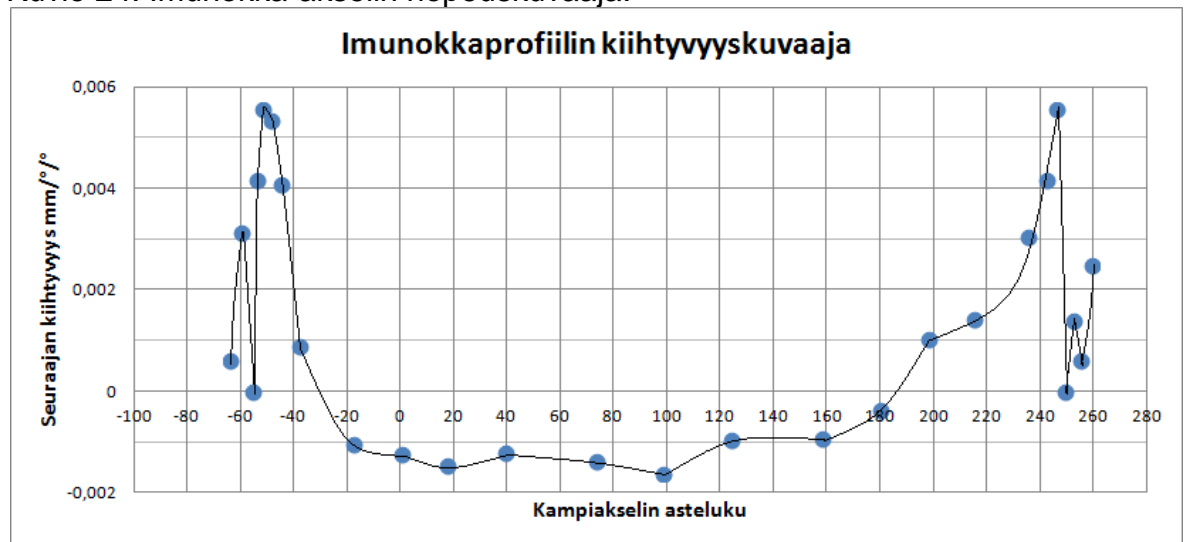
Seuraajan turvallinen toiminta on verrannollinen sen halkaisijaan sekä maksiminopeuteen. 4A-GE:n 28 mm:n halkaisijalla oleva nostimelle turvallinen maksiminopeus on noin  $0,238 \text{ mm/}^\circ$ . Nokkaprofiilin kiihtyvyysskuvaaja antaa sen sijaan tietoa nokka-akselin turvallisesta pyörimisnopeudesta. Mitä pienempi profiilin aiheuttama negatiivinen kiihtyvyys on, sen paremmin venttiilijousi pystyy seuraamaan nokan profiilia. Negatiivisen kiihtyvyyden alueella maksimiarvoksi suositellaan noin  $0,005\text{--}0,007 \text{ mm/}^\circ$ :n hidastuvuutta. Positiivisella alueella arvo voi olla hieman suurempi, noin  $0,015\text{--}0,018 \text{ mm/}^\circ$ . (Bell 1981,15.)

Nopeuskuvaajasta (kuvio 24) nähdään venttiilin nopeuden olevan suurimmillaan noin  $30^\circ$ :n ja  $135^\circ$ :n kohdilla nokka-akselista mitattuna. Nopeus muuttuu näiden pisteiden välillä tasaisesti. Kuten profiilikuvaajastakin voi päätellä, venttiili on pysähdyksissään saavutettuaan maksiminoston noin  $82^\circ$ :n kohdalla. Venttiilin maksimi avautumis- ja sulkeutumisnopeus ovat samoja, noin  $0,24 \text{ mm}$  yhtä nokka-akselin astetta kohden.

Imunokkaprofiilin aiheuttama paininkupin kiihtyvyys nähdään kuviosta 25. Negatiivisen kiihtyvyyden alue on melko tasainen  $160$  kampiakselin asteen ajan. Negatiivisen alueen maksimiarvo esiintyy noin  $100^\circ$ :n kohdalla. Positiivisen kiihtyvyyden huippuarvot esiintyvät samanarvoisina venttiilin avautumis- ja sulkeutumishetkinä. Kiihtyvyysskuvaajan arvot eivät välttämättä ole täysin oikeita, sillä pienetkin mittavirheet muuttavat kiihtyvyyssarvoa huomattavasti. Kuvaajan muoto vastaa kuitenkin mitattua profiilia.



Kuvio 24. Immunokka-akselin nopeuskuvaaja.



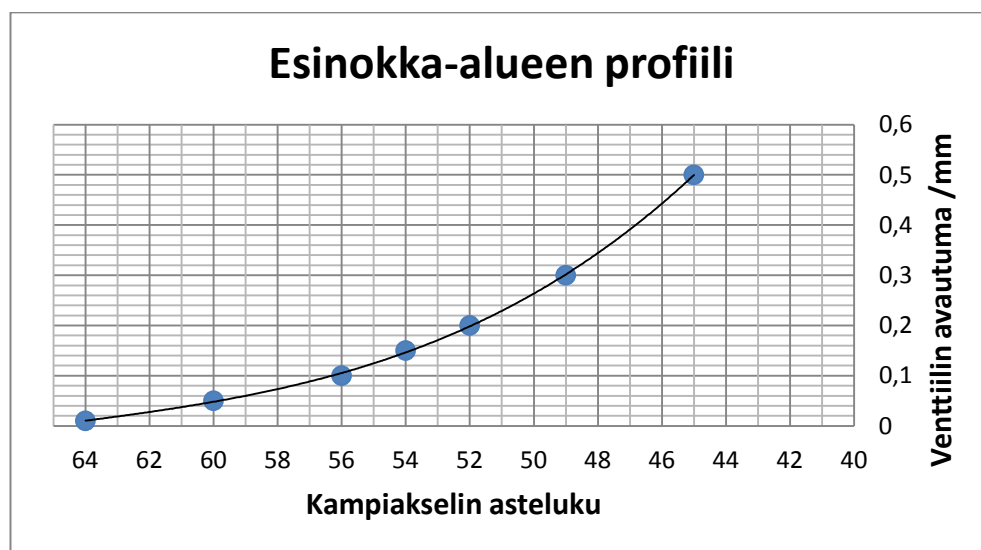
Kuvio 25. Immunokka-akselin kiihtyvyytkuvaaja.



Opinnäytetyön yhteydessä tehtyjen mittausten lisäksi käytössä on myös Speedfactoryn ammattilaisen tekemät alkuperäismittaukset. Näissä mittauksissa venttiilin avautumaa verrataan kampiakselin asteisiin. Liitteenä 3 olevan mittauspöytäkirjan perusteella voidaan tutkia nokan ramppialuetta. Taulukossa 2 on esitetty venttiilin avautuman alkuhetket kampiakselin ja nokka-akselin asteisiin verrattuna. Näiden perusteella voidaan laskea venttiilin avautumisnopeus ramppialueella ja muodostaa ramppialueen profiilikuvaaja (kuvio 26).

Taulukko 2. Imunokkaprofiilin ramppialue.

Nosto /mm	Kampiakselin asteet (EYKK)	Nokan asteet	Avautumisnopeus mm/°
0,01	64	32	
			0,020
0,05	60	30	
			0,025
0,1	56	28	
			0,050
0,15	54	27	
			0,050
0,2	52	26	
			0,067
0,3	49	24,5	
			0,100
0,5	45	22,5	
			0,143
1	38	19	



Kuvio 26. Imunokka-akselin ramppialue.

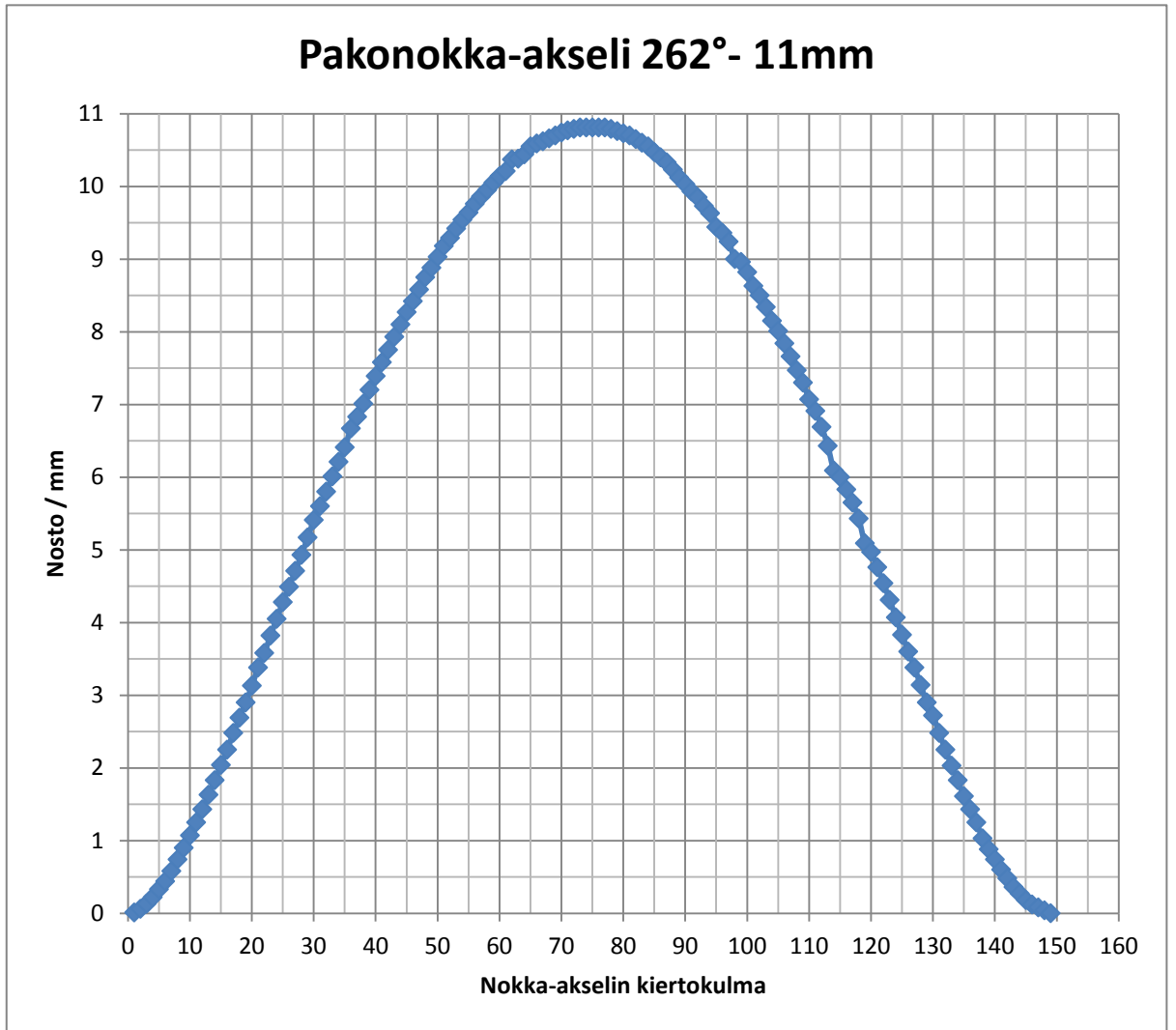
## 6.2 Pakonokka-akseli

Edellä esitellyn imunokka-akselin parina kohdemoottorissa toimi 262-asteinen ja 11 mm:n maksiminostolla oleva akseli. Pakopuolella venttiilivälykseksi on ilmoitettu 0,30 mm. Pakonokan aukioloaika on siis kymmenen astetta lyhyempi ja maksiminosto on puoli millimetriä pienempi. Tämä nokka-akseli tulee olemaan parina uudelle imupuolen akselille, sillä kyseinen nokka on havaittu kokemuseräisesti hyväksi.

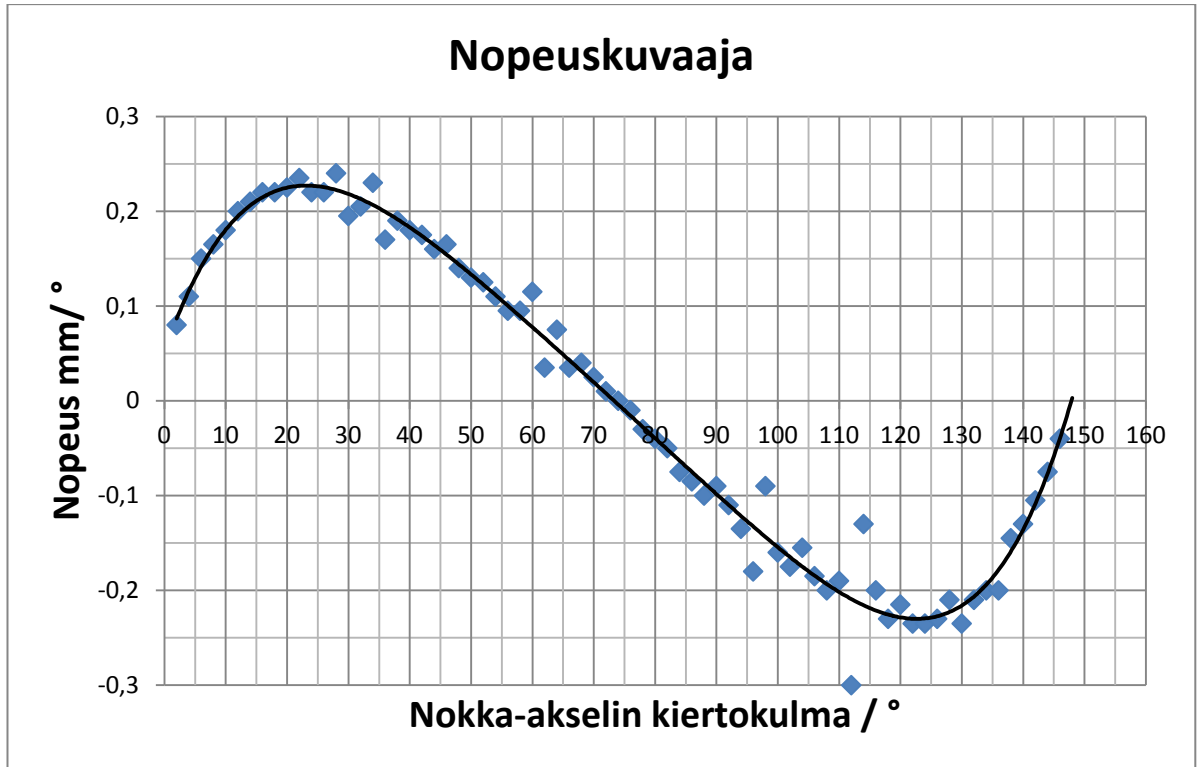
Kuviossa 27 nähdään pakonokka-akselin profiili mitattuna samoin menetelmin kuin imunokankin tapauksessa. Myös tämä nokka on symmetrinen. Avautumisvaihe sekä sulkeutumisvaihe kestävät molemmat noin 146 kampiakselin astetta. Kärki-alue on hieman leveämpi kuin imupuolella. Venttiili pysyy maksimiaukeamassa noin 10 asteen ajan, kun imupuolella vastaava arvo on noin 4 astetta. Suoritettujen mittausten perusteella pakoventtiilin kokonais-aukioloaika on noin 298°.

Nokkaprofiilin nopeus- ja kiihtyvyysskuvaajat (kuvio 28 ja 29) ovat pääpiirtein samanlaisia imunokkaprofiilin kanssa. Kiihtyvyysskuvaajan mittapisteen sisältävät hajontaa, jonka vuoksi kuvioon 28 on piirretty musta apuviiva. Lukuun ottamatta pakoventtiilin avautumishetken kiihtyvyyshuippua, kiihtyvyyss- ja nopeusarvot näyttävät olevan lähellä edellä mainittuja raja-arvoja.

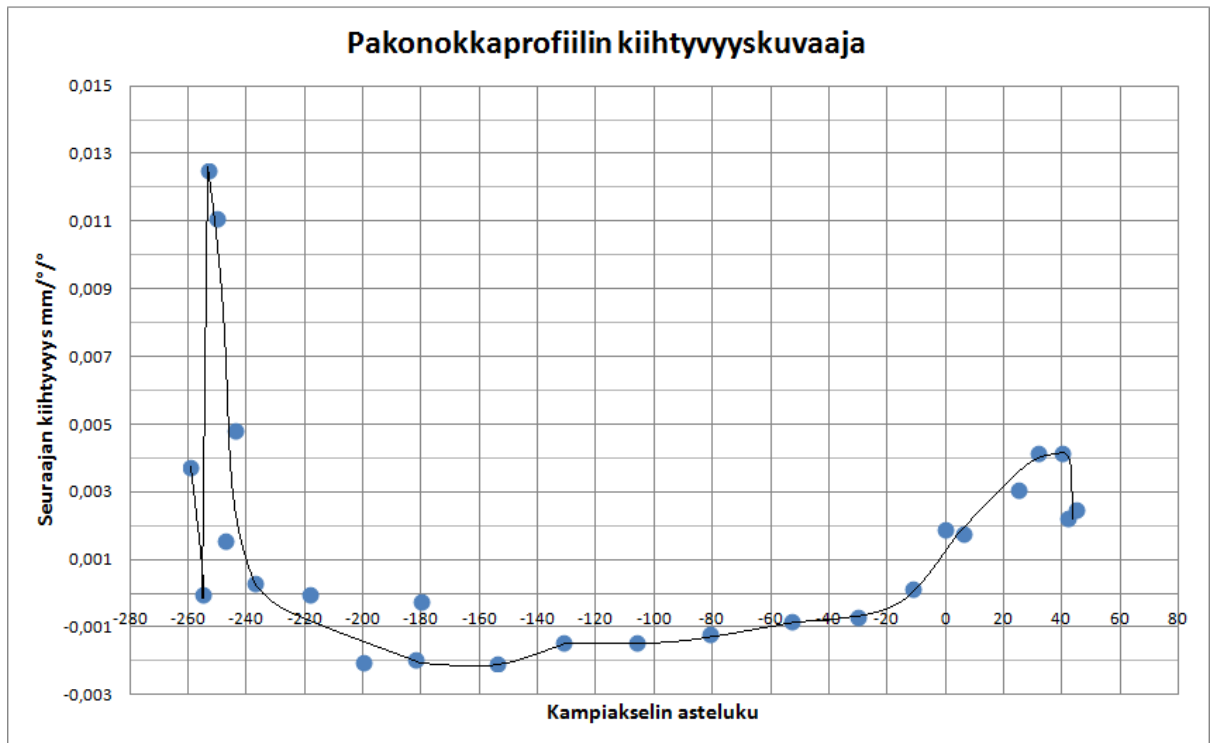
Pakonokkaprofiilissa myös venttiilinousun aloittava ramppialue on mittauksien rajoissa samankaltainen kuin imupuolellakin. Venttiiliaukeaman ensimmäiset noin 0,30 mm tapahtuu hieman hitaammin, minkä jälkeen venttiilin nopeus aloittaa melko suoraviivaisen kasvun. Ramppialueen käyttäytymistä kuvataan taulukossa 3 sekä kuvion 30 diagrammissa.



Kuvio 27. Pakonokka-akselin profiilikuvaaja.



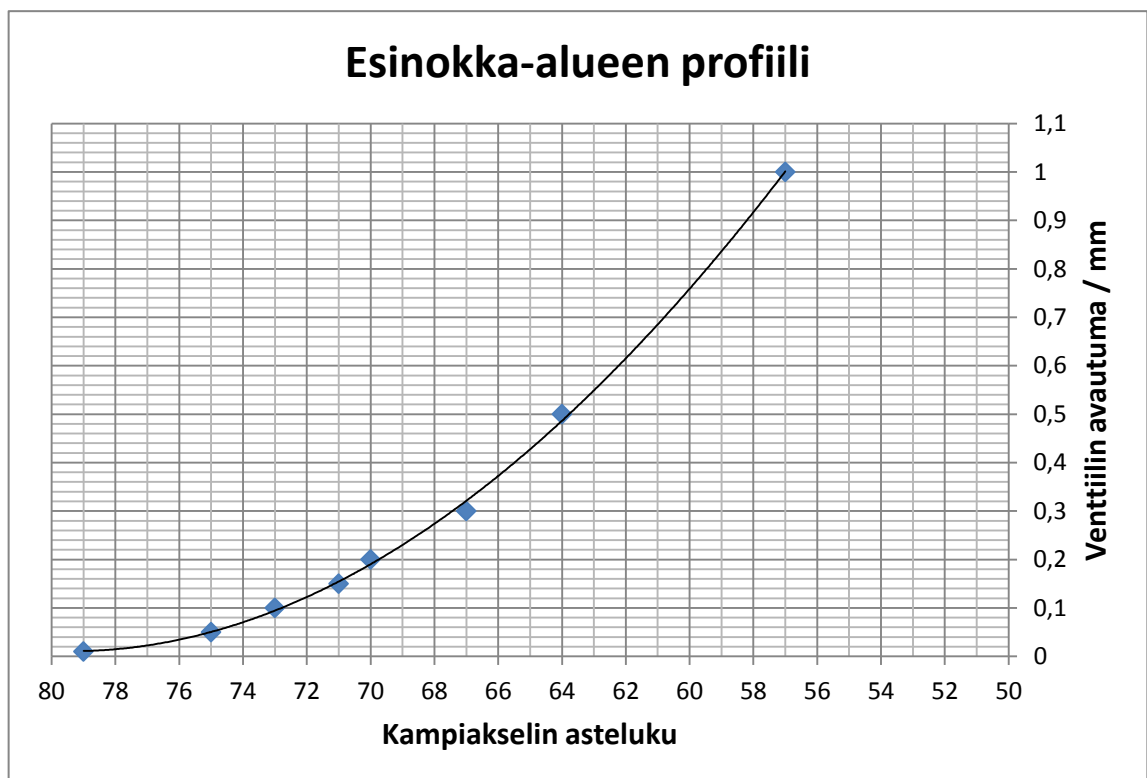
Kuvio 28. Pakonokka-akselin nopeuskuvaaja.



Kuvio 29. Pakonokka-akselin kiihtyvyytkuvaaja.

Taulukko 3. Pakonokkaprofiilin ramppialue.

Nosto	Kampiakselin asteet (EAKK)	Nokan asteet	Avautumisnopeus mm/°
0,01	79	39,5	
			0,02
0,05	75	37,5	
			0,05
0,10	73	36,5	
			0,05
0,15	71	35,5	
			0,10
0,20	70	35	
			0,067
0,30	67	33,5	
			0,133
0,50	64	32	
			0,143
1,0	57	28,5	



Kuvio 30. Pakonokka-akselin ramppialue.

### 6.3 Nokka-akselien yhteistoiminta

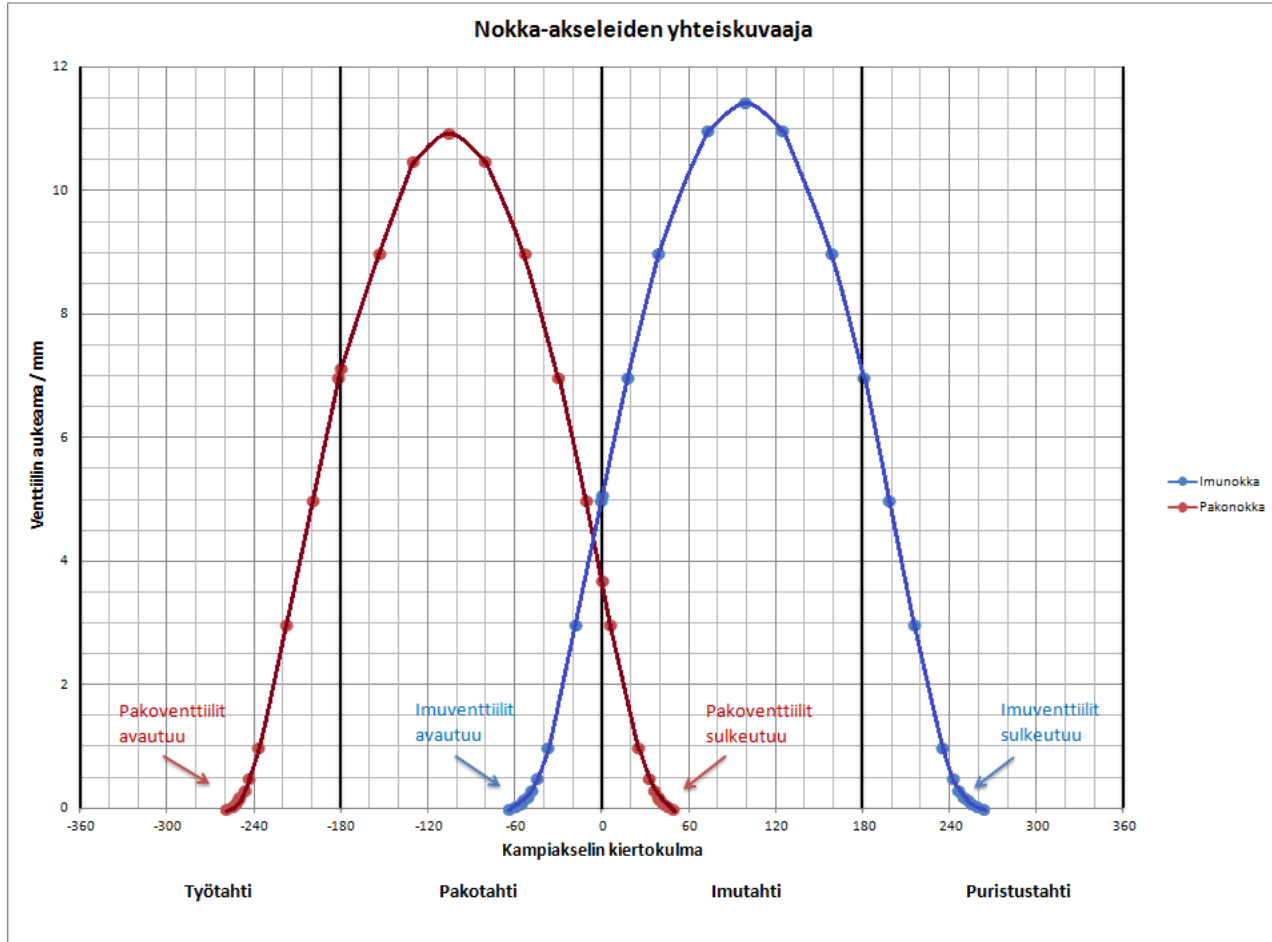
Nokka-akselien yhteistoiminnasta saadaan hyvä käsitys piirtämällä molempien akselien profiilikuvaaja samaan koordinaatistoon. Koordinaatiston x-akselin pituus täyttää kampiakselin kaksi kierrosta, jonka aikana kaikki nelitahtimoottorin tahdit käydään läpi (Kuvio 31).

Mittauksien perusteella laaditusta taulukosta 4 nähdään kaikki nokka-akseliparin tärkeimmät tiedot. Imuventtiilin avautumishetken ja pakoventtiilin sulkeutumisaikojen kohdan perusteella voidaan laskea overlap-jakson olevan 113 asteen pituinen ( $(64^\circ + 49^\circ) / 2$ ). Nokkakulma muodostuu hieman yli  $102^\circ$ :n suuruiseksi kyseisellä akseliparilla. Nokka-akseliparin tarkempi yhteistoiminta on esitetty liitteessä 4.

Huomionarvoista on imuventtiilin pitkä aukioloaika, jolla on suora vaikutus moottorin puristuspaineeseen. Imuventtiili sulkeutuu vasta  $83^\circ$  imutahdin alakäännekohdan jälkeen, jolloin puristustahti on jo lähes puolessavälissä. Kyseisen 4A-GE-moottorin iskunpituus on 77 mm. Mikäli imuventtiili sulkeutuisi heti alakäännekohdassa, sylinteripaine kasvaisi koko kyseisen männän liikematkan ajan. Sulkeutumisaikakohta  $83^\circ$  tarkoittaa sitä, että puristustahdista on kulunut jo 46,1 % ( $(83/180) * 100$ ). Tällöin sylinteripaine kasvaakin vain puristustahdin viimeisen noin 41,5 mm:n ajan ( $((100 \% - 46,1 \% ) / 100) * 77 \text{mm}$ ). Näin ollen on erittäin tärkeää ymmärtää puristussuhteen ja puristuspaineen välinen ero.

Taulukko 4. Malliakselien ominaisuudet.

Ominaisuus	Imunokka	Pakonokka
Venttiilivälitys	0,25mm	0,3mm
Maksimi venttiilinnousu	11,45mm	10,95mm
Aukioloaika (1mm → 1mm)	272°	262°
Kokonais-aukioloaika	327°	308°
Venttiili auki ykk:ssa	5,1mm	3,7mm
Venttiili auki akk:ssa	7,00mm	7,15mm
Ajoitusarvo	64°/83°	79°/49°
Nokkakulma	102,25°	
Overlap- jakson pituus	113°	



Kuvio 31. Malliakselien toiminta.

## 7 UUSI NOKKAPROFIILI

Tässä kappaleessa suunnitellaan uudenlainen nokkaprofiili tutkimuskohteena olevaan Toyotan moottoriin. Profiili pyritään suunnittelemaan niin, että sen käyttö kilpamoottorissa olisi perusteltua ja profiilin aiheuttamat rasitukset venttiilikoneistoon tulisi huomioida.

### 7.1 Venttiilinousu

Uuden nokkaprofiilin noston määrittäminen aloitettiin sylinterikannen virtausominaisuuksien perusteella. Sylinterikannen virtausarvo alkaa tasaantua noin 11 mm venttiilin aukeaman jälkeen, kuten kuvio 20 on nähtävissä. Tämän tiedon perusteella uuden nokka-akselin maksiminoston lähtökohdaksi asetettiin noin 11–11,5 mm. Profiilin luonteesta riippuen noston tarkka määrittäminen suunnittelun alkuvaiheessa on vaikeaa, koska venttiilinousulla on suora vaikutus venttiilin kiihtyvyyksiin ja täten venttiilikoneiston kuormitukseen.

Toyotan 4A-GE-moottorin venttiilikoneistossa on suora paininkuppiohjaus, joten paininkupin halkaisija tulee huomioida maksiminostoa suunnitellessa. Mikäli nosto olisi liian suuri paininkupin halkaisijaan verrattuna, saattaisi syntyä tilanne, jossa nokan kylki painaa paininkupin reunaan. Työssä käytetyssä moottorissa on Super-techin valmistamat alkuperäisellä 28 mm:n halkaisijalla olevat paininkupit. Nokka-akselissa on tarkoitus käyttää malliakseleiden tapaan 27,3 mm perusympyrää, täten 11,5 mm nostollakaan kyseistä ongelmaa ei voi syntyä.

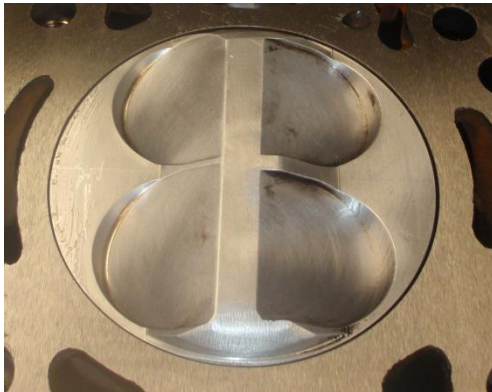
### 7.2 Venttiilin ja männän välinen etäisyys

Venttiiliajoituksen kannalta konkreettisimman rajoitteen muodostaa imuventtiilin ja männän välinen toimintavälitys imutahdin yläkäännekohtassa. Imuventtiili ja mäntä voivat osua toisiinsa, mikäli venttiili aloittaa aukeamisen liian aikaisin. Tämän työn kohdemoottorissa käytetään Wisecon valmistamia kilpamäntiä, joissa on alkuperäisenä syvennykset venttiilien kohdalla suuremman venttiiliaukeaman mahdollistamiseksi (kuvio 32).



Venttiilin ja männän välinen etäisyys voidaan mitata yksinkertaisesti. Esimerkiksi 1. sylinterin mäntä nostetaan tarkkaan yläkäännekohtaansa mittakelloa hyväksi käyttäen. Sylinterikanteen asennetaan venttiili paikoilleen, mutta oikea venttiilijousi korvataan huomattavasti löysemmällä jousella. Tämän jälkeen kansi asennetaan paikoilleen käytetyn kannentiivisteen kanssa. Itse mittaus suoritetaan painamalla venttiiliä auki, kunnes tämä osuu mäntään. Samalla venttiilin liikkeen pituus mitataan mittakellolla. Mikäli käytössä oleva jousi on tarpeeksi löysä, venttiilin pystyy painamaan auki varovasti sormin.

Edellä kuvatulla mittaustavalla mitattuna kohdemoottorissa venttiilin ja männän välinen etäisyys yläkäännekohdassa on 6,7 mm. Toyotan 4A-GE-moottorissa on havaittu yläkäännekohdassa riittävän 1,2 mm välitys imuventtiilin ja männän välillä (Laukkanen 2013–2014). Tällöin imuventtiili voi olla imutahdin yläkäännekohdassa avautuneena maksimissaan 5,5 mm (6,7 mm-1,2 mm).



Kuvio 32. Männän venttiiliväistöt.

### 7.3 Sylinteritäytös

Kuten edellä on käynyt ilmi, imutahdin aikana sylinteriin imetään uutta seosta, mutta osa seoksesta poistuu kuitenkin takaisin imusarjaan venttiilin pitkän aukioloajan seurauksena.

Moottorin vanhalla imunokka-akselilla mäntä imee sylinteriin uutta seosta 180 kampiakselin asteen ajan, mutta työntää seosta takaisin imusarjaan 83° pituisen liikkeen aikana. Todellisuudessa seosta virtaa edellä mainituista syistä kanavaan jo ennen varsinaisen imutahdin alkua, mutta tämä jätetään huomioimatta.

Männän alaspäin suuntautuvan liikkeen muodostaman imuvaiheen alkaessa imuventtiili on avautuneena 5,1 mm. Alakäännekohdassa venttiilin avautuma on 7,0 mm (ks. Taulukko 4). Näiden männän ääriasentojen välissä venttiili käy luonnollisesti myös maksimiavautuman kohdalla. Tämän liikkeen aikana sylinterikannen keskimääräinen virtausarvo Taulukon 1 tiedoista laskettuna on 53,4 l/s. Puristustahdin alussa imuventtiili on siis avautuneena 7,0 mm, kunnes sulkeutuu 83 kampiakselin asteen kuluttua. Tällä välillä imukanavan virtauksen keskiarvoksi saadaan 28,7 l/s.

Moottorin käyntinopeuden ollessa 8000 rpm nokka-akseli pyörii 4000 kierrosta minuutissa. Tällöin yhteen kierrokseen kuluu aikaa 0,015 s ( $60 \text{ s}/4000$ ). Sylinteriin virtaa täten uutta seosta 0,0075 sekunnin ajan ( $((180^\circ/360^\circ) \cdot 0,015 \text{ s})$ ). Näin ollen moottoriin imettäisiin uutta seosta 0,4005 litraa yhtä imutahtia kohden ( $0,0075 \text{ s} \cdot 53,4 \text{ l/s}$ ).

Puristustahdin alussa imuventtiili on avautuneena 0,00346 sekunnin ajan ( $((83^\circ/360^\circ) \cdot 0,015 \text{ s})$ ) moottorin käyntinopeuden ollessa edelleenkin 8000 rpm. Täten sylinteristä poistuu seosta 0,099 litraa puristustahdin alkuvaiheessa.

Kyseisellä karkealla laskutavalla todellinen uusi sylinteritäytös olisi teoriassa siis 0,3015 litraa (0,4005 l - 0,099 l). Lukema on vain teoreettinen, sillä tässä ei oteta huomioon seoksen virtausta ennen varsinaisen imutahtin alkua eikä osuutta, joka virtaa mahdollisesti suoraan pakokanavaan. Uutta imunokkaprofiilia suunnitellessa tätä arvoa voidaan kuitenkin vertailla, jolloin saadaan tietoa profiilin vaikutuksesta sylinteritäytökseen.

#### **7.4 Profiili**

Nokkaprofiilin suunnittelussa täytyy ottaa huomioon moottorin haluttujen ominaisuuksien lisäksi venttiilikoneistoon kohdistuvat rasitukset. Sopivan profiilin määrittäminen on aikaa vievää työtä, minkä vuoksi ammattilaiset käyttävät nokka-akselin suunnitteluun tarkoitettuja tietokoneohjelmia (Hotrod 1.4.2010).

Kuten edellä on todettu, nokan profiilista voidaan tehdä joko symmetrinen tai epäsymmetrinen. Tarkoituksena on pyrkiä hyvään sylinteritäytökseen, joten epäsymmetrinen profiili olisi eduksi nokan kärkialueella, jolloin imuventtiilin avausjaksoa ja kärkialuetta voitaisiin pidentää ja sulkea venttiili nopeasti jyrkempää profiilia käyttäen.

Nokka-akselin sijoituskohte on hyvin ylävireinen moottori, jonka huipputeho sijaitsee noin 8000 rpm:n käyntinopeudella. Moottorin vääntömomentinkin kannalta paras kierrosalue on 5000–8000 rpm, joten nokka-akselia suunniteltaessa moottorin korkea käyntinopeus tulee huomioida (Liite 1). Epäsymmetrinen profiili aiheuttaa äkkinäisen kiihtyvyyden muutoksen profiilin vaihtuessa. Nopea venttiilin sulkeutuminen kasvattaa myös venttiilin ja seuraajan kiihtyvyyttä siirryttäessä kärkialueelta venttiilin sulkemisvaiheeseen. Tämän vuoksi epäsymmetrinen profiili vaatisi jäykemmän venttiilijousen, jotta venttiilin oikeanlainen liike olisi mahdollista. Venttiilikoneiston kestävyys ja toiminnan varmistamiseksi mahdollisimman pienellä joustikuormalla tässä työssä käytetään symmetristä nokkaprofiilia.

Kuten venttiilikoneiston toimintaperiaatetta käsitellessä todettiin, sylinteritäytöksellä on suora vaikutus moottorin suorituskykyyn. Kasvattamalla sylinteritäytöstä moottorista voitaisiin saada siis suorituskykyisempi. Tämä fysiikan lakeihin perustuva tosiasia antoi lähtökohdan uudelle nokkaprofiilille. Vertailuakselia käyttämällä imuventtiilin kokonais-aukioloajaksi muodostui kuitenkin jo varsin pitkä aika, 327 kampiakselin astetta.

Imuventtiilien kokonais-aukioloajan pidentäminen aiheuttaisi kuitenkin ongelmia, mikäli nokkien välinen asema pidettäisiin samana. Tässä tapauksessa symmetristä nokkaprofiilia käyttäessä overlap-jakson pituus kasvaisi väistämättä ja kuten nokkakulmaa käsitellessä todettiin, tällainen overlap-jakson pituuden kasvaminen saattaisi aiheuttaa moottorin tehon laskemista kierrosalueen yläpäässä. Kyseistä ongelmaa voitaisiin välttää, mikäli nokka-akselin ajoitusta siirrettäisiin myöhäisemmälle. Tällöin imuventtiili olisi kuitenkin pidempään auki männän jo liikkuessa puristustahdissa ylöspäin ja täten puristusaine laskisi.

Liitteen 1 tehomittaustodistuksen perusteella moottorin suorituskykyä vanhalla nokka-akseliparilla voidaan pitää hyvänä. Motorset Ky:n tehopenkissä mitattujen parhaiden f-ryhmän 4A-GE-moottoreiden maksimiteho on noin 220–230 hv ja maksimivääntö noin 200 Nm. Moottorin vääntökäyrä on myös kyseiseen moottorityyppiin nähden mukavan laaja ja tasainen. Näiden ominaisuuksien vuoksi pakonokka-akselin ajoitusarvot haluttiin pitää lähtökohtaisesti samoina.

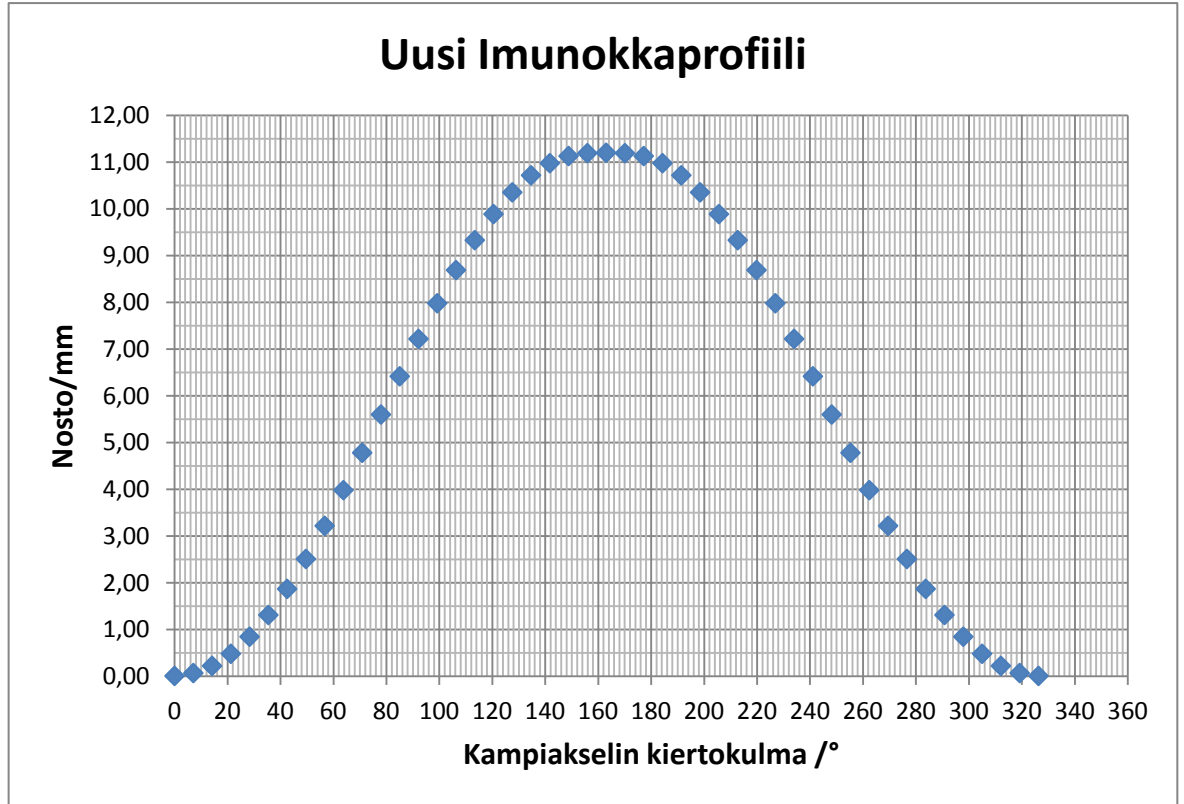
Edellä mainituista syistä johtuen sylinterin täytösasteen kohottaminen toteutetaan venttiilin pidemmällä aukioloajalla maksiminoston alueella. Täten nokan kärjen tulisi olla pyöreämpi kuin vanhassa imunokka-akselissa. Venttiilin aukiolon kasvattaminen noston maksimialueella vaikuttaa suuresti sylinteritäytökseen, sillä tällä alueella sylinterikannen virtausominaisuudet ovat parhaimmillaan (ks. taulukko1).

Uusi nokkaprofiili on yhdistelmä sykloidisesta profiilista ja harmonisen liikkeen profiilista. Kuten erilaisia profiileja käsitellessä todettiin, näiden profiilien käyttö muodostaa profiilikuvaajasta jouhean ja mahdollistaa halutunlaisen leveän nokkaprofiilin kärkialueen (kuvio 33). Profiilin pohjana on Modified sine curve -profiili (Moon 1961, N-2). Tässä ratkaisussa nokan profiilista on tehty kuitenkin huomattavasti jyrkempi ja esinokka-alueesta selvästi lyhyempi. Nokkaprofiili on muodostettu muokkaamalla profiilikuvaajaa Microsoft Excelin avulla seuraten profiilin muutosten vaikutusta seuraajan nopeuteen ja kiihtyvyyksiin.

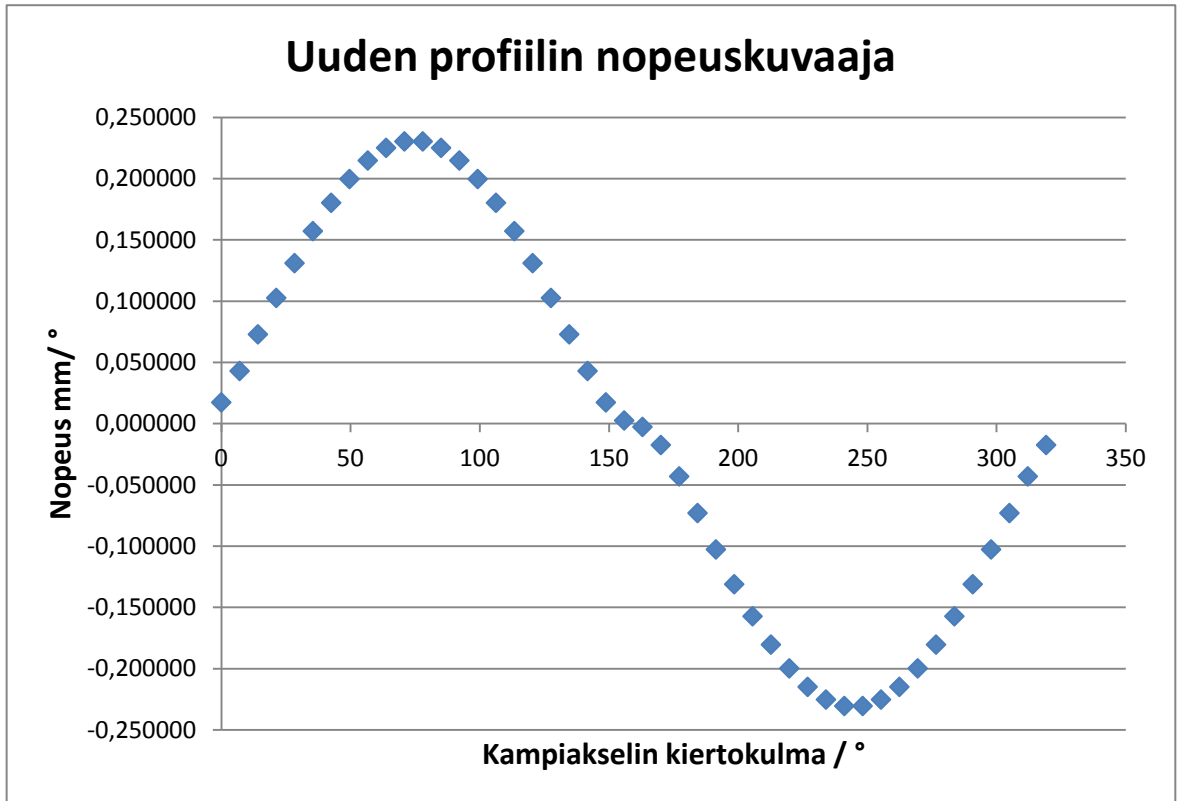
Imuventtiilin aukioloajan kasvattaminen maksiminoston alueella näkyy selvästi profiilin nopeus- ja kiihtyvyysskuvaajissa. Kuviossa 34 nähdään noin 160°:n kohdassa venttiilin nopeudessa epäjatkuvuuskohta venttiilin saavutettua maksiminousun. Tällöin imuventtiilin nopeuden muutos on erittäin pieni, mikä näkyy selvänä kiihtyvyyden muutoksena kuviossa 35.

Suunnitellun profiilin maksiminoston ja aukioloajan optimoinnilla seuraajan maksiminopeudeksi muodostui 0,23 mm/°, jonka ei pitäisi aiheuttaa venttiilikoneiston toiminnalle vaaraa. Suurimman venttiilikoneistoon aiheutuvan rasituksen muodostaa seuraajan negatiivisen kiihtyvyyden maksimiarvo -0,00842 mm/°/°. Kyseinen arvo ylittää 0,0014 yksiköllä edellä mainitun Bellin (1981) suosituksen. Positiivisen kiihtyvyyden maksimiarvo on 0,00842 mm/°/°, joka on selvästi pienempi kuin aiemmin mainittu raja-arvo.

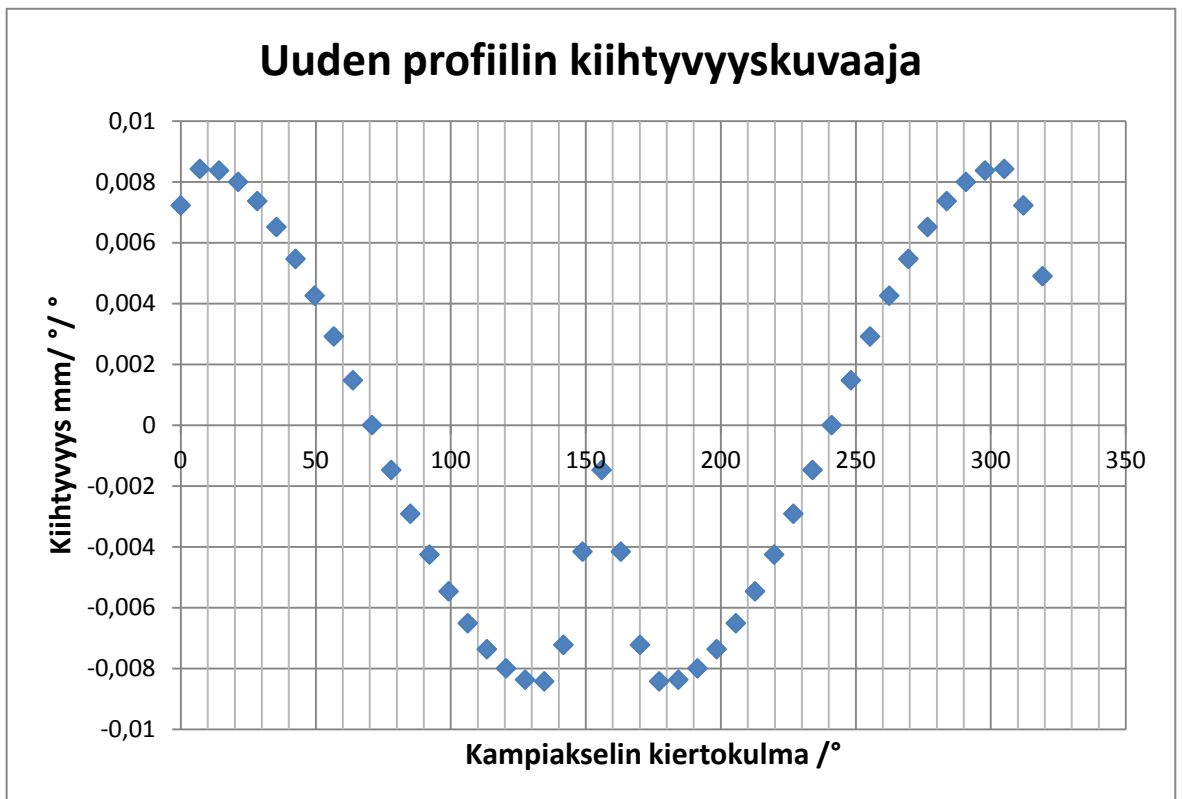
Negatiivisen kiihtyvyyden maksimiarvo esiintyy seuraajan lähestyessä nokan kärkialuetta ja maksiminoston ohittamisen jälkeen, joten tämä tulee huomioida venttiilijousta valittaessa. Positiivinen maksimiarvo on suurimmillaan venttiiliavautuman alkuhetkillä ja hieman ennen venttiilin sulkeutumista.



Kuvio 33. Suunniteltu nokkaprofiili.



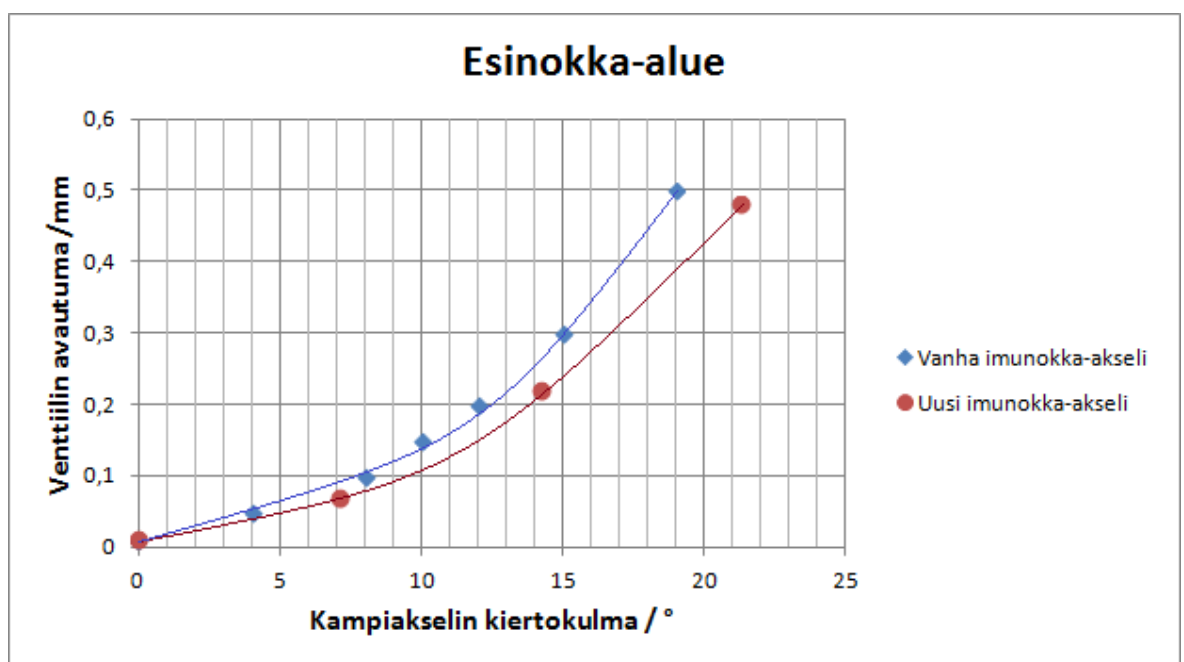
Kuvio 34. Suunnitellun profiilin nopeuskuvaaja.



Kuvio 35. Suunnitellun profiilin kiihtyvyytkuvaaja.

## 7.5 Esinokka-alue

Kuten venttiilijousen toimintaa ja massavoimia käsitellessä todettiin kilpamoottoreiden jäykät venttiilijouset lisäävät positiivisten massavoimien vaikutusta venttiilin sulkeutuessa. Venttiilikoneiston kestävyuden varmistamiseksi suunnitellun profiilin esinokka-alue on loivempi kuin vanhassa profiilissa. Profiilin loivan esinokka-alueen johdosta venttiilin avautuminen tapahtuu myös jouheammin vähentäen venttiilikoneistoon kohdistuvaa kuormitusta. Kuviossa 36 on esitetty suunnitellun profiilin ja vanhan imunokka-akselin esinokka-alue samassa koordinaatistossa.



Kuvio 36. Esinokka-alueen profiili.

## 7.6 Venttiilin aukioloaika

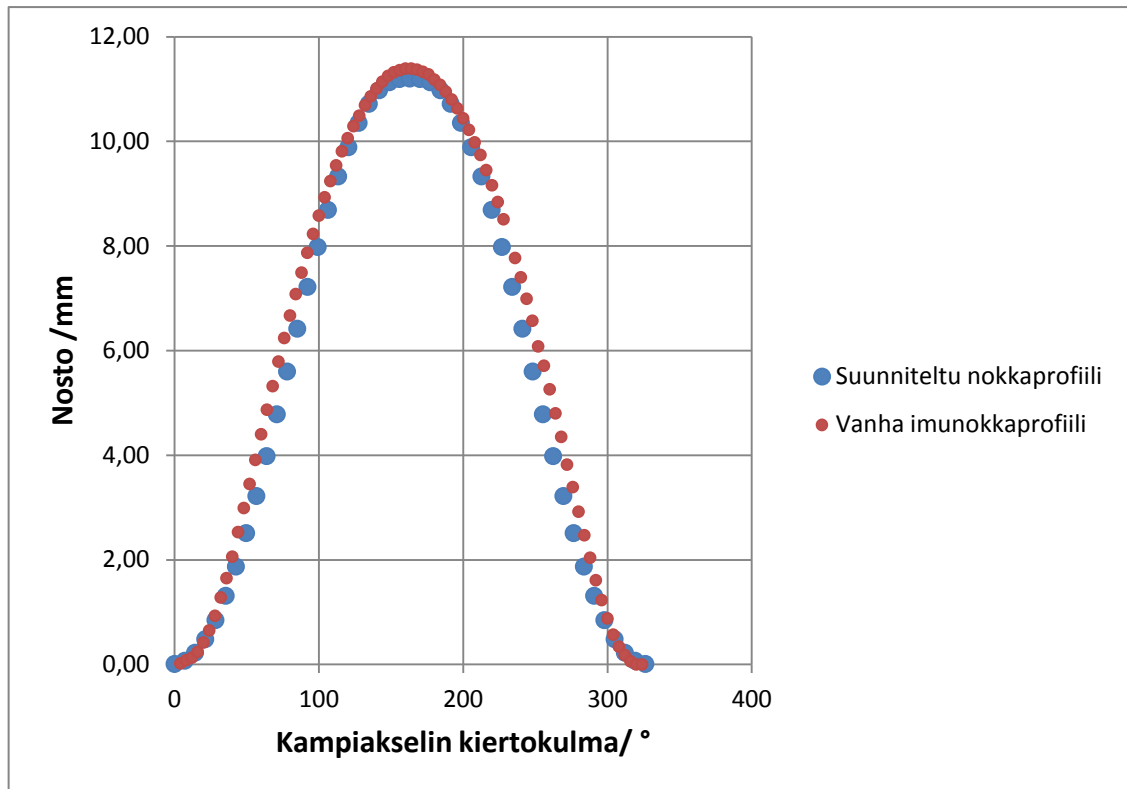
Suurimmassa osassa markkinoilla olevista virityskäyttöön tarkoitetuista nokka-akseleissa venttiilin kokonais- aukioloaika on välillä 270–310°. Kyseinen 40 kampiakselin asteen vaihteluväli kattaa lähes kaikki moottorityypit viritetystä katuautosta varsinaisiin kilpamoottoreihin. (Hammill 2014, 16.)

Neliventtiilitekniikalla varustettujen DOCH-moottorien imukanavien virtausominaisuudet saadaan muokattua huomattavasti paremmiksi, kuin vanhempaa tekniikkaa edustavien SOHC- tai työntötankomoottorien tapauksessa. Tästä syystä johtuen sylinteritäytös saadaan pidettyä hyvänä, vaikka moottorin maksimikäyntinopeus olisi jopa 10000 rpm. Hyvä moottorin tehoalue ja maksimitehon käyntinopeus on välillä 3500–9000 rpm, mikäli nokka-akselin aukioloaika on noin 290°. Tehokas moottorin käyttöalue nousee välille 4500–10000 rpm, mikäli nokka-akseli on noin 300 asteinen. (Hammill 2014, 22.)

Aukioloajaltaan 290 asteisella nokalla toimiva venttiiliajoitus on noin 37°/73° ja 300 asteisella noin 42°/78°. Käytettäessä yli 300°:n aukioloajalla olevaa nokka-akselia venttiiliajoitus on tyypillisesti suuruusluokaltaan 50°/80°. Imuventtiilin sulkeutumisen maksimiarvona voidaan pitää 80° JAKK missä tahansa moottorissa. Tätä suuremmalla arvolla moottorin huipputeho ei juuri kasva, ainoastaan moottorin tehokas käyttöalue pienenee. (Hammill 2014, 18.)

Käytännön tehodynamometrimittauksissa on huomattu, että käyttämällä tämän työn kohteena olevan moottorin pakonokkaprofiilia myös imupuolella moottorin teho ja vääntöominaisuudet saadaan hyviksi (Laukkanen 2013- 2014). Tämän käytännön kokemuksen ja edellä mainittujen kirjallisuudesta löytyvien tietojen perusteella suunnitellun nokka-akselin aukioloaikaa lyhennettiin vanhaan imunokka-akseliin nähden. Uuden profiilin ”millistä milliin” arvo on 264° ja kokonais- aukioloajaksi muodostuu 326°. Kokonais- aukioloaikaa kyseisellä profiililla pidentää suhteellisen loiva esinokka-alue. Profiilin aukioloajan muutosta havainnollistaa parhaiten kuvio 37, jossa on esitetty uusi ja vanha profiilikuvaaja samassa koordinaatistossa.





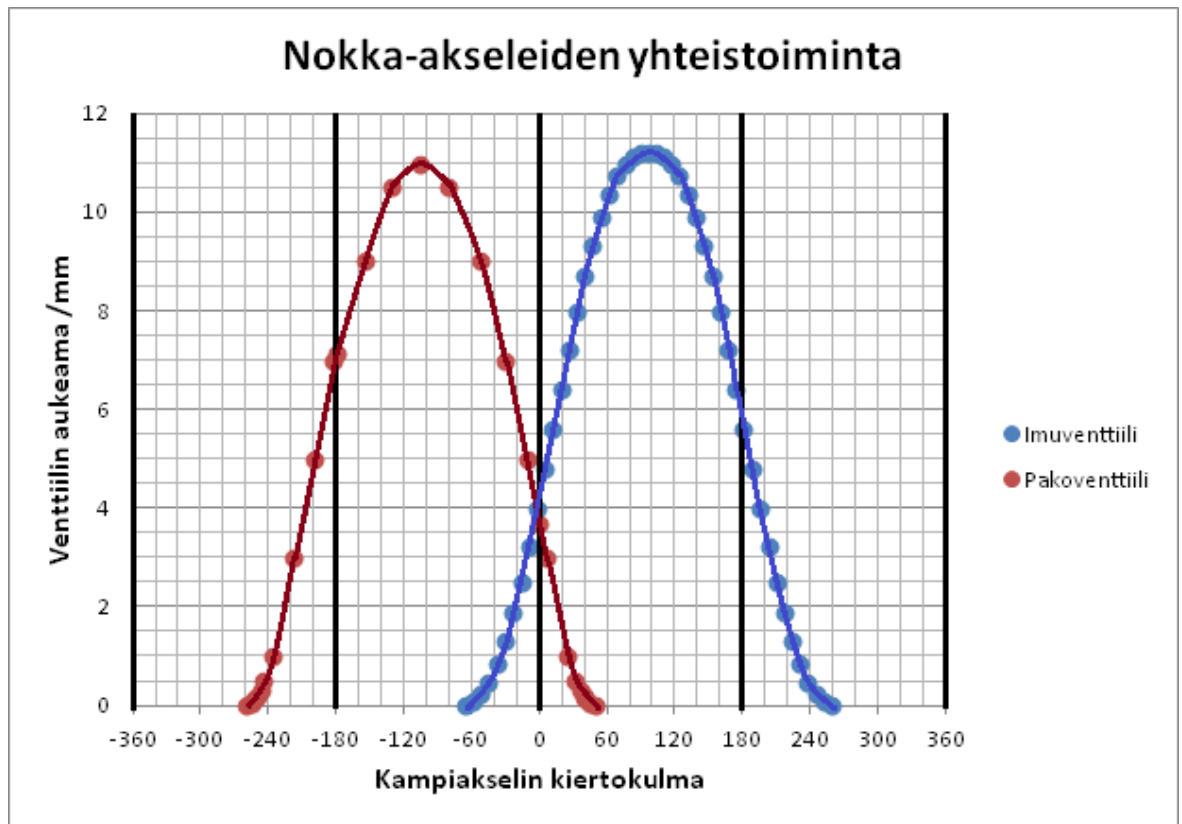
Kuvio 37. Venttiilin aukioloajan muutos.

## 7.7 Ajoitus

Nokka-akselin ajoitusarvoksi asetettiin  $66^{\circ}/79^{\circ}$ , mitattuna venttiilin varsinaisen avautumisen alkamisesta. Kyseisellä ajoitusarvolla nokkakulma ja overlap- jakson pituus pysyvät käytännössä samoina vanhaan nokka-akselipariin verrattuna. Tällä pyritään varmistamaan teho- ja vääntökäyrän hyvä muoto myös uudella nokka-akselilla. Suunniteltua nokka-akselia käyttämällä imuventtiili on auki imutahdin yläkäännekohtassa 4,2mm. Venttiilin ja männän välinen etäisyys on tällöin 2,5mm, joten vaaraa näiden törmäämiseen ei ole.

Suunnitellulla nokkaprofiililla imuventtiili sulkeutuu 4 astetta aikaisemmin vanhaan nokka-akseliin verrattuna. Tästä johtuen sylinteriin muodostuva puristusaine hienomman kasvaa. Kyseessä olevia pitkän aukioloajan omaavia nokka-akseleita käyttäessä 4A-GE-moottorin puristussuhde olisi hyvä olla noin 13:1 normaalilla E98-bensiinillä ajettaessa (Laukkanen 2013- 2014). Tutkimuskohteena olevan moottorin puristussuhde on 12,8:1, joten puristusaineen hienon nousun pitäisi parantaa moottorin suorituskykyä vaarantamatta moottorin kestävyttä.

Uuden nokka-akseliparin tärkeimmät tiedot on kerätty taulukkoon 5 ja näiden yhteistoimintaa selventää kuvion 38 ajoituskuvaaja.



Kuvio 38. Suunnitellun profiilin ajoituskuvaaja.

Taulukko 5. Uusi nokka-akselipari.

Ominaisuus	Imunokka	Pakonokka
Maksimi venttiilinnousu	11,20mm	10,95mm
Aukioloaika (1mm →1mm)	264°	262°
Kokonais-aukioloaika	326°	308°
Venttiili auki ykk:ssa	4,2mm	3,7mm
Venttiili auki akk:ssa	5,7mm	7,15mm
Ajoitusarvo	66°/79°	79°/49°
Nokkakulma	101,5°	
Overlap- jakson pituus	115°	

## 7.8 Sylinteritäytöksen muutos

Sylinteritäytöksen muutoksesta voidaan tehdä päätelmiä laskemalla myös uuden nokka-akseliparin muodostama sylinteritäytös ja vertaamalla sitä edellä esitettyyn laskentaan. Suunniteltua nokkaprofiilia käyttämällä imuventtiili on imutahdin yläkäännekohdassa avautuneena 4,2 mm ja alakäännekohdassa 5,7 mm. Tällä välillä sylinterikannen keskiarvovirtaus on taulukon 1 tietojen mukaan 51,6 l/s. Varsinainen imutahti kestää 8000 rpm käyntinopeudella edellä mainitun 0,0075 s, joten imutahdin aikana sylinteriin virtaa uutta seosta 0,387 l.

Imuventtiili sulkeutuu 79° imutahdin alakäännekohdan jälkeen. Imuventtiili on täten puristustahdin aikana avautuneena 0,00329 s, jonka aikana venttiili liikkuu matkan 5,7 mm avautumasta kiinni- asentoon. Tällä liikematkalla sylinterikannen keskiarvovirtaus on 25,3 l/s. Näin ollen puristustahdin aikana sylinteristä virtaa seosta takaisin imukanavaan 0,0832 l.

Käyttämällä uutta nokkaprofiilia teoreettiseksi sylinteritäytökseksi saataisiin 0,3037 litraa. Kyseinen arvo on hieman suurempi, kuin moottorin vanhalla nokka-akselilla laskettu 0,3017 l. Täten sylinteritäytöksen voidaan ajatella teoriassa pysyvän oikeassa suuruusluokassa. Tarkan sylinteritäytöksen määrittämiseksi tulisi ottaa huomioon lukuisia muuttujia, joiden selvittäminen tämän opinnäytetyön yhteydessä on mahdotonta.

## 7.9 Profiilin vaatimukset venttiilijouselle

Kuten venttiilijousta ja massavoimia käsitellessä todettiin, kriittisin tarkastelun kohde venttiilijousta mitoittaessa on seuraajan negatiivisesta kiihtyvyydestä johtuva negatiivinen massavoima. Venttiilijousen minimijäykkyyttä määritettäessä täytyy siis laskea voiman suuruus, jonka negatiivisen kiihtyvyyden maksimiarvo saa aikaan.

Moottorin maksimikäyntinopeus on noin 8500 rpm, jolloin nokka-akselin pyörimisnopeus on puolet pienempi, 4250 rpm. Ensimmäiseksi lasketaan montako kierrosta nokka-akseli pyörähtää sekunnin aikana.

$$\frac{4250 \text{ rpm}}{60} = 70,83 \text{ kierrosta sekunnissa}$$

Täten yhteen nokka-akselin kierrokseen kuluu aikaa:

$$\frac{1}{70,83} = 0,014118 \text{ s}$$

Seuraajan negatiivisen kiihtyvyyden huippuarvo esiintyy kampiakselin aseman muuttuessa välillä  $177,2^\circ$ – $184,3^\circ$ . Kampiakselin kiertokulman muutos on tällöin  $7,1$  astetta. Nokan kiertokulman muutos on  $3,55^\circ$  nokka-akselin pyörimisnopeuden ollessa vain puolet kampiakselin liikkeeseen nähden. Tällä välillä nokka-akselin nopeuden muutos on  $-0,029909 \text{ mm}/^\circ$  (liite 5).

Nokka-akselin kiertokulman yhden asteen muutokseen kuluu aikaa:

$$\frac{1}{360^\circ} * 0,014118 \text{ s} = 0,000039216 \text{ s}$$

Seuraavaksi nopeuden muutos  $-0,029909 \text{ mm}/^\circ$  muutetaan yksikköön  $\text{mm}/\text{s}$  ja siitä edelleen yksikköön  $\text{m}/\text{s}$ .

$$\frac{1^\circ}{0,000039216 \text{ s}} = 25499,796 \text{ }^\circ/\text{s}$$

$$25499,796 \text{ }^\circ/\text{s} * (-0,029909 \text{ mm}/^\circ) = -762,67 \text{ mm}/\text{s} = 0,76267 \text{ m}/\text{s}$$

Nokka-akselin kiertokulman muutokseen kuluu aikaa:

$$\frac{3,55^\circ}{360^\circ} * 0,014118 \text{ s} = 0,000139219 \text{ s}$$

Täten seuraajan keskikihtiivyyys kyseisellä nokka-akselin kiertokulman muutosvä-  
lillä on:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{0,76267 \text{ m/s}}{0,000139219 \text{ s}} = 5478,203 \text{ m/s}^2$$

Newtonin II lain ja taulukon 6 massojen mukaan laskettuna kyseinen kiihtiivyyys muodostaa voiman:

$$F = ma = (0,042 \text{ kg} + 0,0205 \text{ kg} + 0,006 \text{ kg} + 0,002 \text{ kg} + 0,028 \text{ kg}) * 5478,203 \text{ m/s}^2 \\ = 539,603 \text{ N}$$

Täten venttiilijousen tulee 11 mm noston kohdalla muodostaa vähintään tämän suuruinen, mutta vastakkaissuuntainen voima. Venttiilijousipuntareissa yksikkö on yleensä kilogramma, joten kyseinen lukema vastaa 55 kg jousivoimaa ( $539,603 \text{ N} / 9,81 \text{ m/s}^2$ ). Laskennassa venttiilijousien massasta on huomioitu vain  $\frac{1}{2}$  ja venttiilijousen lukkosokkia ei ollenkaan, koska näiden massa on alle 0,5 g.

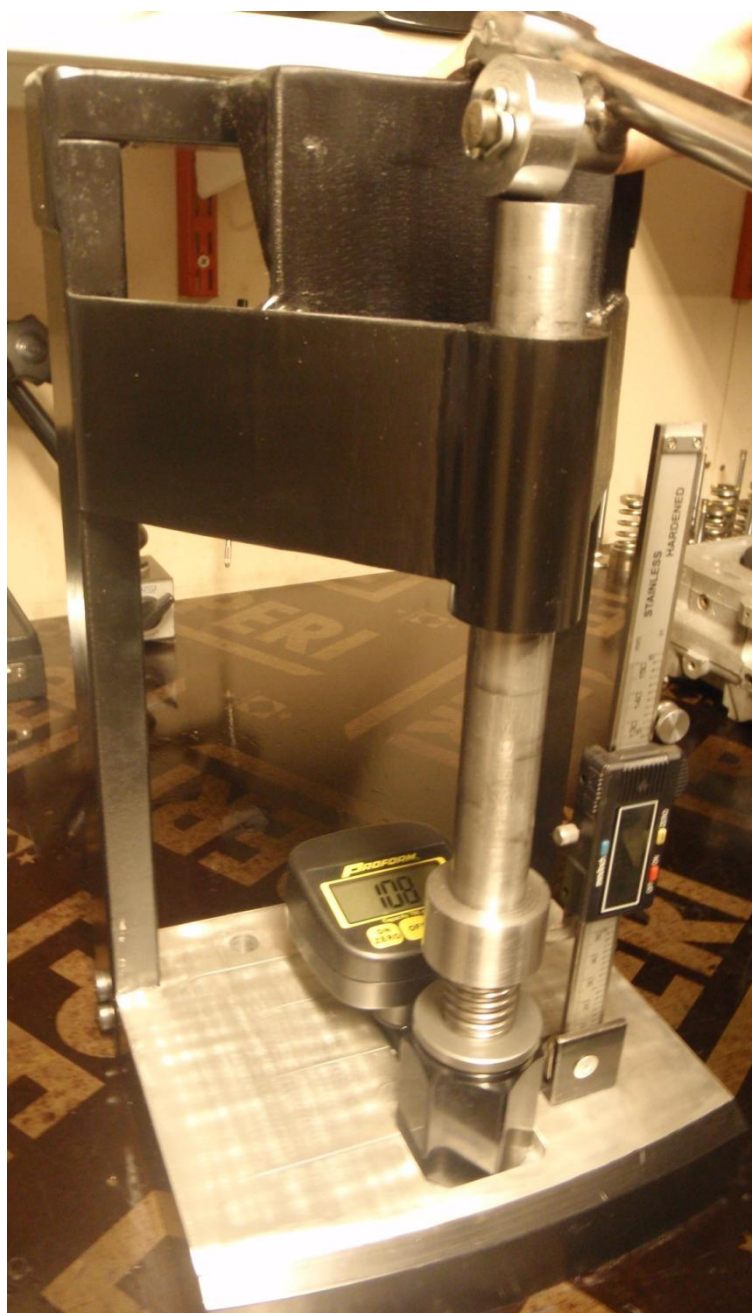
Tutkimuskohteena olevassa rallimoottorissa käytetään Supertechin valmistamia tuplaventtiilijousia. Puristettaessa venttiilijousia kasaan mitaan, mikä vastaa 11 millimetrin nostoa asennuspituus huomioituna, saadaan venttiilijousien jousivoimaksi 108 kg (kuvio 39). Jakamalla jousen venttiiliin kohdistama voima nokka-akselin kohdistamalla voimalla saadaan venttiilijousen varmuuskerroin.

$$\frac{108 \text{ kg}}{55 \text{ kg}} = 1,96$$

Yli 10000 rpm käyntinopeudella toimivan Yamahan R6-moottoripyörän moottorissa venttiilijousen varmuuskertoimeksi on mitattu 1,7, joten suunnitellun nokkaprofiilin kanssa voidaan käyttää edellä mainittuja Supertechin venttiilijousia (Ahonen 2008).

Taulukko 6. Venttiilikoneiston osien massat.

Venttiilikoneiston osa	massa /g
Venttiili	42
Venttiilijouset	41
Jousilautanen	6
Säätöpala	2
Paininkuppi	28



Kuvio 39. Jousipaineen mittaus.

## 7.10 Seuraajaan kohdistuva rasitus

Venttiilijousen ollessa lineaarinen suurin jousen venttiiliin kohdistama voima esiintyy maksiminoston aikana. Tällä samalla voimalla paininkuppi painaa nokan kärkeä. Suunnittelun kohteena olevassa moottorissa käytetään Supertechin valmistamia paininkuppeja, joiden maksimi pintapaineen kestoksi ilmoitettiin 70 kg/mm<sup>2</sup> (Tagliavini 2014).

Suunnitellussa nokkaprofiilissa nokan kärkialue on leveämpi ja maksiminosto pienempi kuin vanhassa nokka-akselissa. Täten paininkuppiin kohdistuvan pintapaineen täytyy laskea uutta nokkaprofiilia käyttäessä (kaava 1). Nokan ja paininkupin välisen pintapaineen ollessa pienempi myös näiden välisen öljykalvon rikkoutumisen riski alenee. Tässä opinnäytetyössä seuraajaan kohdistuvaa rasitusta ei tutkita syvällisemmin nokan ja paininkupin välisen kosketuspinta-alan määrittämisen ollessa hyvin hankalaa.

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$p = \text{paine}$

$F = \text{voima}$

$A = \text{pinta} - \text{ala}$

## 7.11 Venttiilivällys

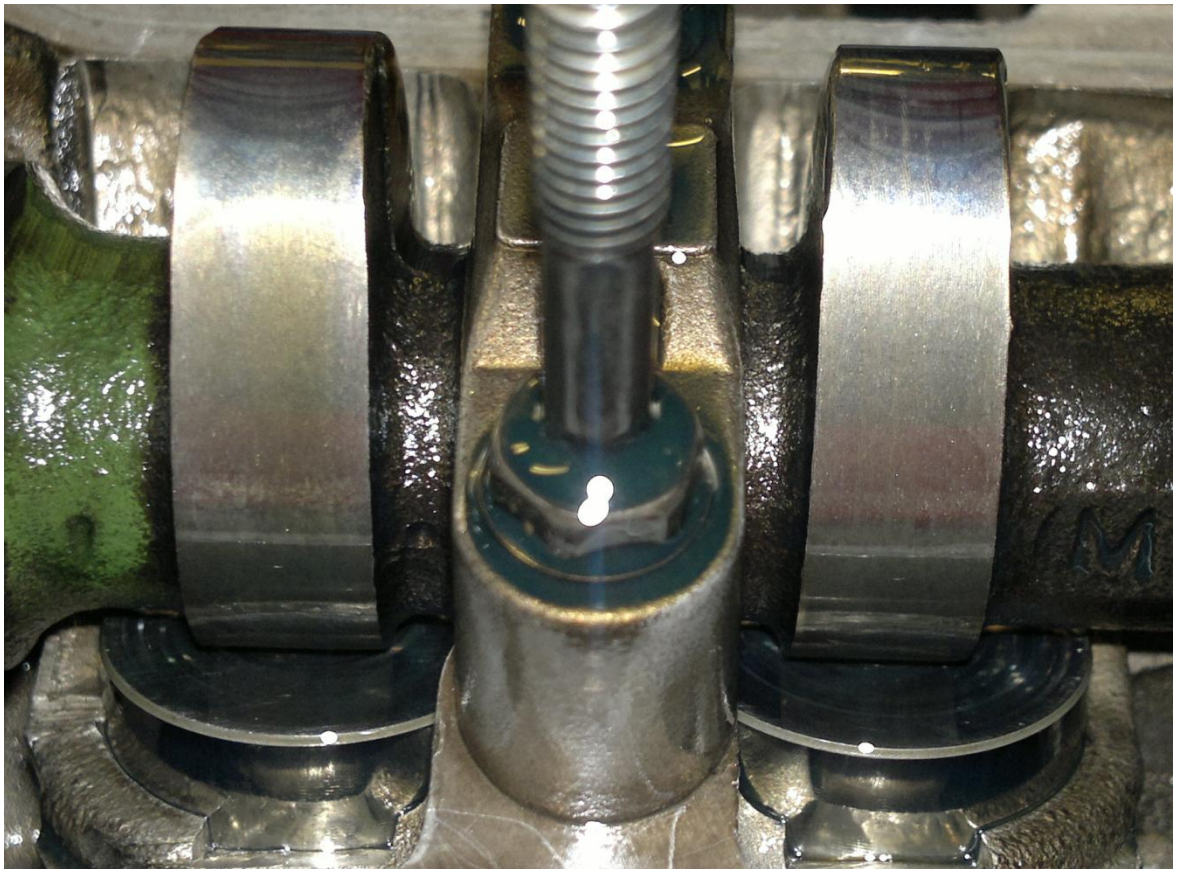
Venttiilin täydellisen sulkeutumisen mahdollistamiseksi nokan perusympyrän ja seuraajan välillä täytyy olla vällys tilanteessa, jolloin venttiilin halutaan olevan sulkeutuneena. Tämä koskee venttiilikoneiston rakennetta, jossa ei käytetä hydraulisia venttiilinostimia. Niin sanottuja kiinteitä seuraajia käytetään pääasiassa vanhemmissa moottoreissa, kuten tutkimuskohteena olevassa Toyotan moottorissa. Venttiilivällyksen suuruus riippuu moottorityypistä ja käytössä olevista nokkaakseleista (Hammill 2014,12).

Malliakseleihin on suunniteltu imupuolelle 0,25 mm ja pakopuolelle 0,30 mm venttiilivällys (Laukkanen 2013–2014). Venttiilivällystä miettiessä on otettava huomioon venttiilikoneiston eri osien lämpölaajeneminen, jotta venttiilien suunniteltu liike toteutuisi. Mitattaessa toiminnassa olevan Toyotan 4A-GE-moottorin venttiilivällys moottorin ollessa kylmä ja toistaessa mittausta moottorin ollessa toimintalämpöinen, törmättiin mielenkiintoiseen asiaan (kuvio 40). Nopeasti ajateltuna voisi kuvitella nokka-akselin, venttiilin ja seuraajan lämpölaajenevan niin, että venttiilivällys pienenesi moottorin lämpötilan kasvaessa. Todellisuudessa venttiilivällyksen huomattiin suurenevan moottorin lämpötilan kasvaessa. Liitteen 6 mittauspöytäkirjasta näkee venttiilivällyksen kasvaneen noin 0,05–0,10 mm moottorin saavutettua tavanomaisen käyntilämpötilan.

Myös ammattilaisen tekemien havaintojen perusteella Toyotan 4A-GE-moottorin imunokka-akselin venttiilivällys kasvaa moottorin lämpötilan noustessa. Pakonokka-akselin venttiilivällyksen on havaittu pysyvän mittaustarkkuuden rajoissa vakiona. Imupuolen venttiilivällyksen suurenemisen täytyy johtua alumiinisen sylinterikannen lämpölaajenemisesta, sekä suuresta imukanavan virtauksesta. Sylinterikannen lämpölaajenemisen johdosta nokka-akseleiden laakeroinnin poikkileikkauksen keskipisteen täytyy nousta lohkon tasopintaan verrattuna. Samaan aikaan imuventtiilissä tapahtuva lämpölaajeneminen on vähäisempää. Imuventtiilin lämpölaajenemista rajoittaa imuilman viilentävä vaikutus. Pakopuolella erittäin kuuma pakokaasu kasvattaa venttiilin lämpötilaa, jolloin sylinterikannen lämpölaajeneminen ja venttiilin lämpölaajeneminen kumoavat toisensa. (Laukkanen 2013- 2014.)



Tietoa venttiiliväläyksen kasvamisesta moottorin lämpötilan noustessa voidaan käyttää hyväksi nokka-akselin valmistuksessa. Tehtyjen mittausten perusteella 4A-GE moottorissa voidaan käyttää 0,20–0,25 mm venttiilivälystä vaarantamatta venttiilikoneiston toimintaa. Tämä edellyttää kuitenkin, että uusi nokka-akseli valmistetaan lämpöominaisuuksiltaan samanlaisesta pallografiittiteräksestä, kuin mittauksissakin käytetyt nokka-akselit. Venttiilivälitys täytyy olla tiedossa nokka-akselia koneistettaessa, jotta varsinaisen nokka-akselin saataisiin muodostamaan suunnitellun kaltainen venttiilin liike. Suunnitellun nokkaprofiilin tuli muodostaa 11,20 mm maksiminosto. Mikäli nokka koneistettaisiin niin, että perusympyrän ja nokan kärjen kohtisuora etäisyys toisistaan olisi kyseinen 11,20 mm, ei nokka-akseli toimisi halutulla tavalla. Tässä tapauksessa nokan todellinen nosto olisi noin 11 mm venttiiliväläyksestä johtuen. Kyseinen asia on huomioitava tietenkin koko venttiilin liikkeen ajalta. Tässä opinnäytetyössä ei perehdytä tämän enempää konkreettisen nokka-akselin koneistukseen, vaan se jätetään mahdollisen nokka-akselin valmistajan tehtäväksi.

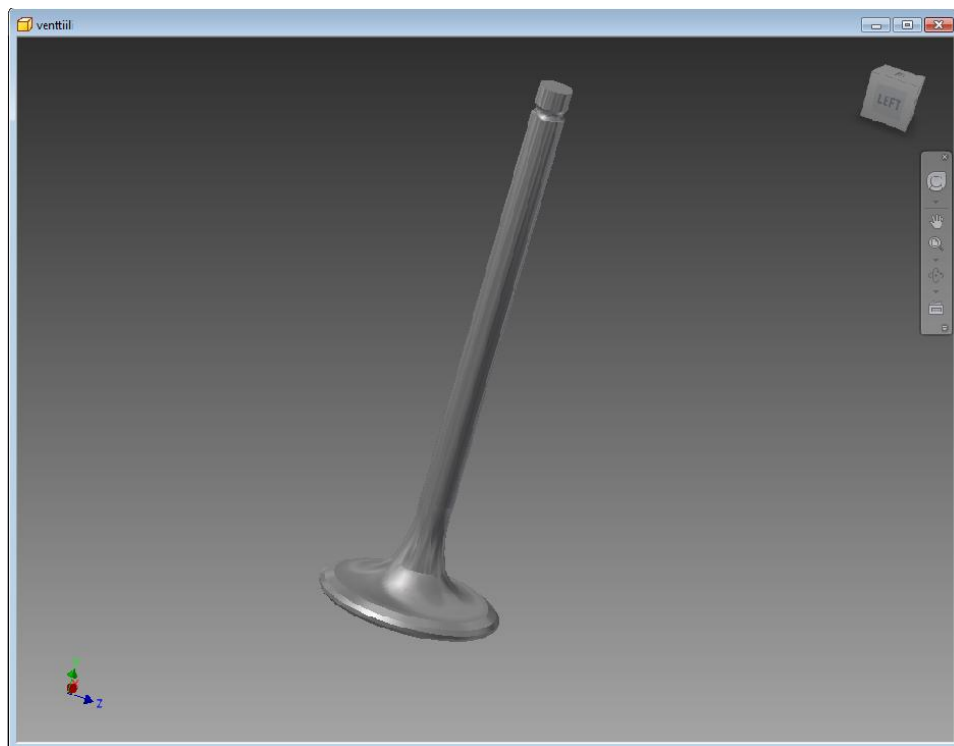


Kuvio 40. Nokka-akseli venttiiliväläyksen mittausasennossa.

## 7.12 Imuventtiiliin kohdistuva raskuus

Imuventtiiliin kohdistuvaa raskuutta tutkittiin Autodesk Inventor 2013 Professional-suunnitteluohjelman avulla. Venttiiliin kohdistuvien voimien perusteella selvitettiin suurimmat veto- ja puristusjännitykset, joiden perusteella voitaisiin määrittää venttiilin kestävyys. Venttiilin kestävyyttä tutkitaan suunnitellun nokkaprofiilin tietojen perusteella moottorin käydessä 8500 rpm käyntinopeudella (liite 7). Tarkastelun kohteeksi asetettiin kokemuspohjaisesti venttiiliin heikoimmiksi alueiksi tiedetyt venttiilijousen sokkaura ja venttiilivarren alaosa. Raskuusten määrittämiseksi käytössä olevista Ferrean valmistamista venttiileistä tehtiin mahdollisimman tarkka 3D-malli (kuvio 41).

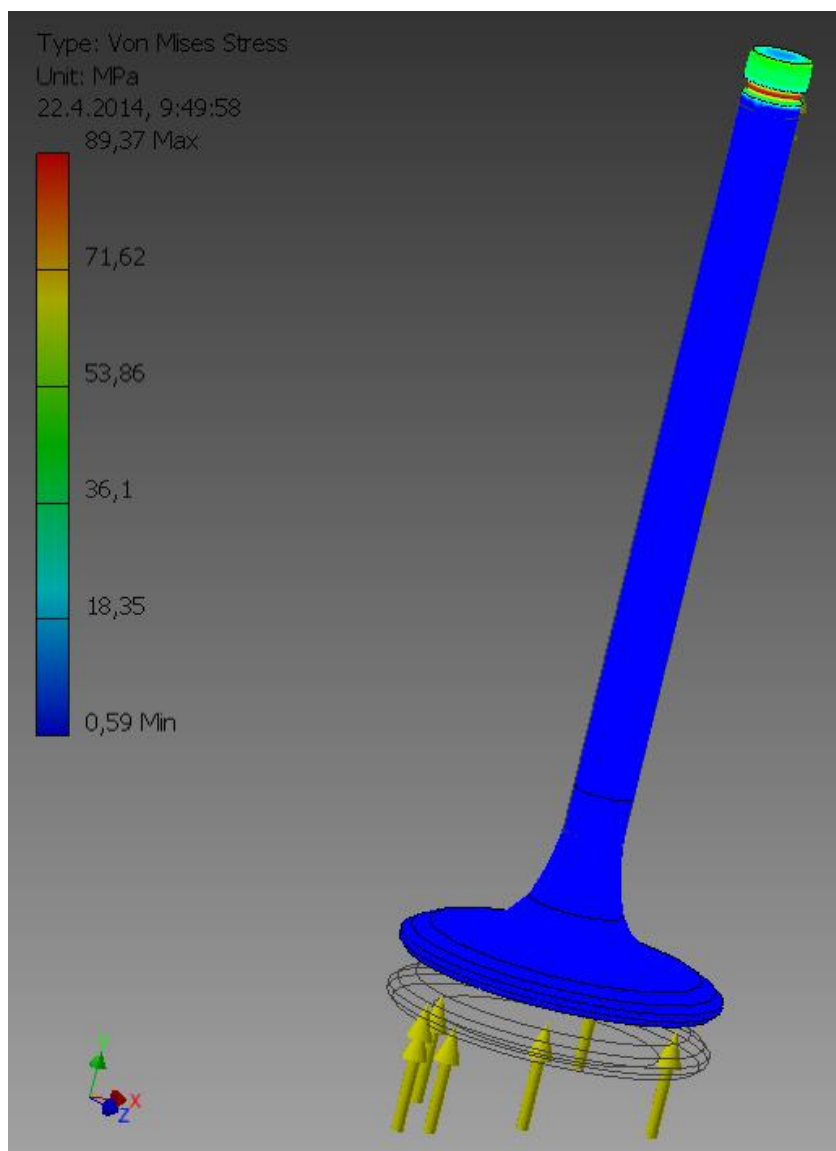
Kohdemoottorissa olevat Ferrean F1421P-venttiilit valmistetaan ruostumattomasta SAE EV-8 (21-4N) -teräksestä. Kyseisen venttiilimateriaalin myötöraja on 580 N/mm<sup>2</sup> ja murtolujuus 950–1200 N/mm<sup>2</sup>. Venttiilin suhteellisen pienen massan mahdollistaa materiaalin tiheys, 7,8 kg/dm<sup>3</sup>. (Urrutia 2014.)



Kuvio 41. Imuventtiilin 3D-malli.

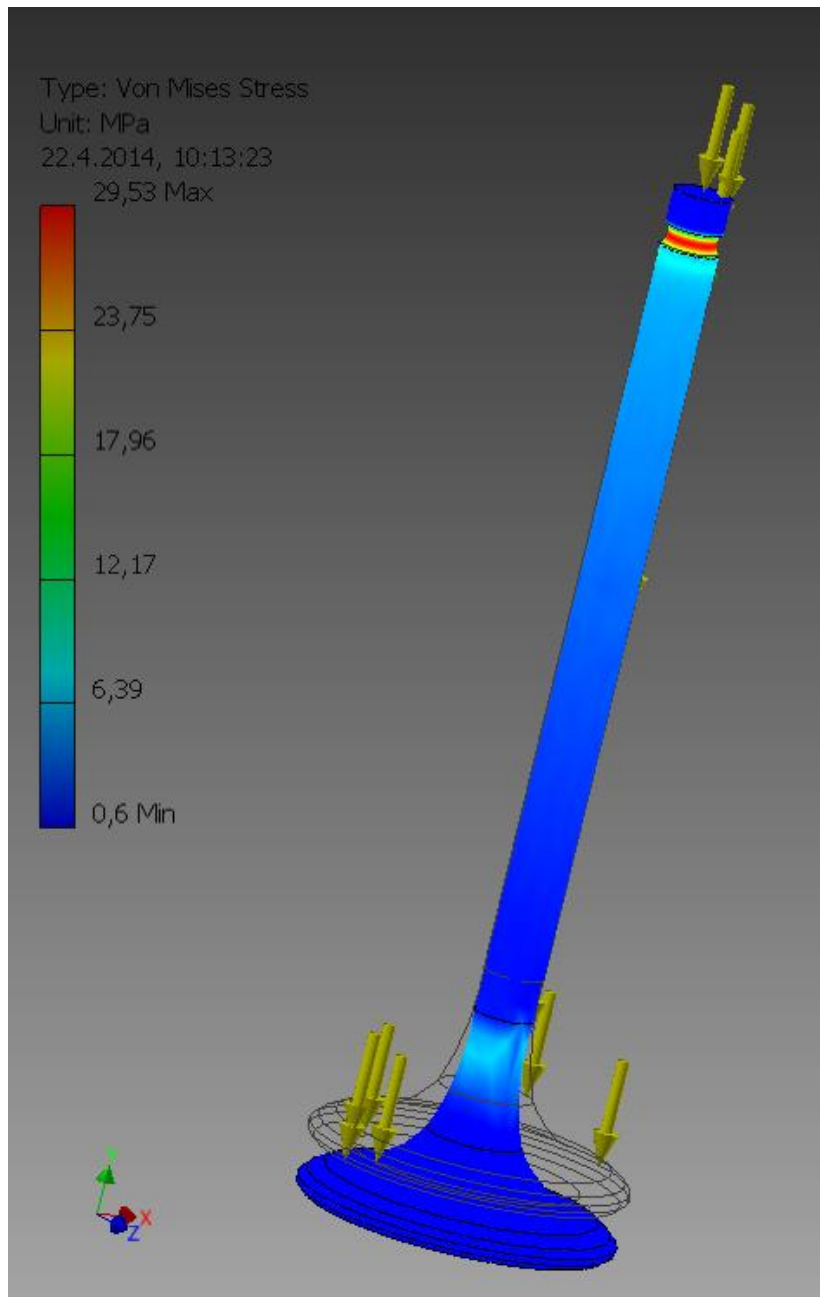
### 7.12.1 Venttiilin lukitusuran maksimijännitykset

Venttiilin lukitusuran suurin puristusjännitys esiintyy hetkelle, jolloin venttiili on kiihtyvässä liikkeessä seuraajan ohitettua nokan kärkialueen. Venttiiliavautuman ollessa lähes maksimissaan on myös venttiilijousen jousivoima lähes suurimmillaan. Kyseisellä hetkellä kiihtyvyys aiheuttaa venttiiliin 539,6 N:n voiman ja puristusjännitystä lisää venttiilijousen aiheuttama 975,8 N:n samansuuntainen voima. Tässä tilanteessa venttiilin lukitusuraan syntyy noin 89,4 MPa:n puristusjännitys, joka näkyy tumman punaisena alueena kuvion 42 venttiilissä.



Kuvio 42. Lukitusuraan kohdistuva puristusjännitys.

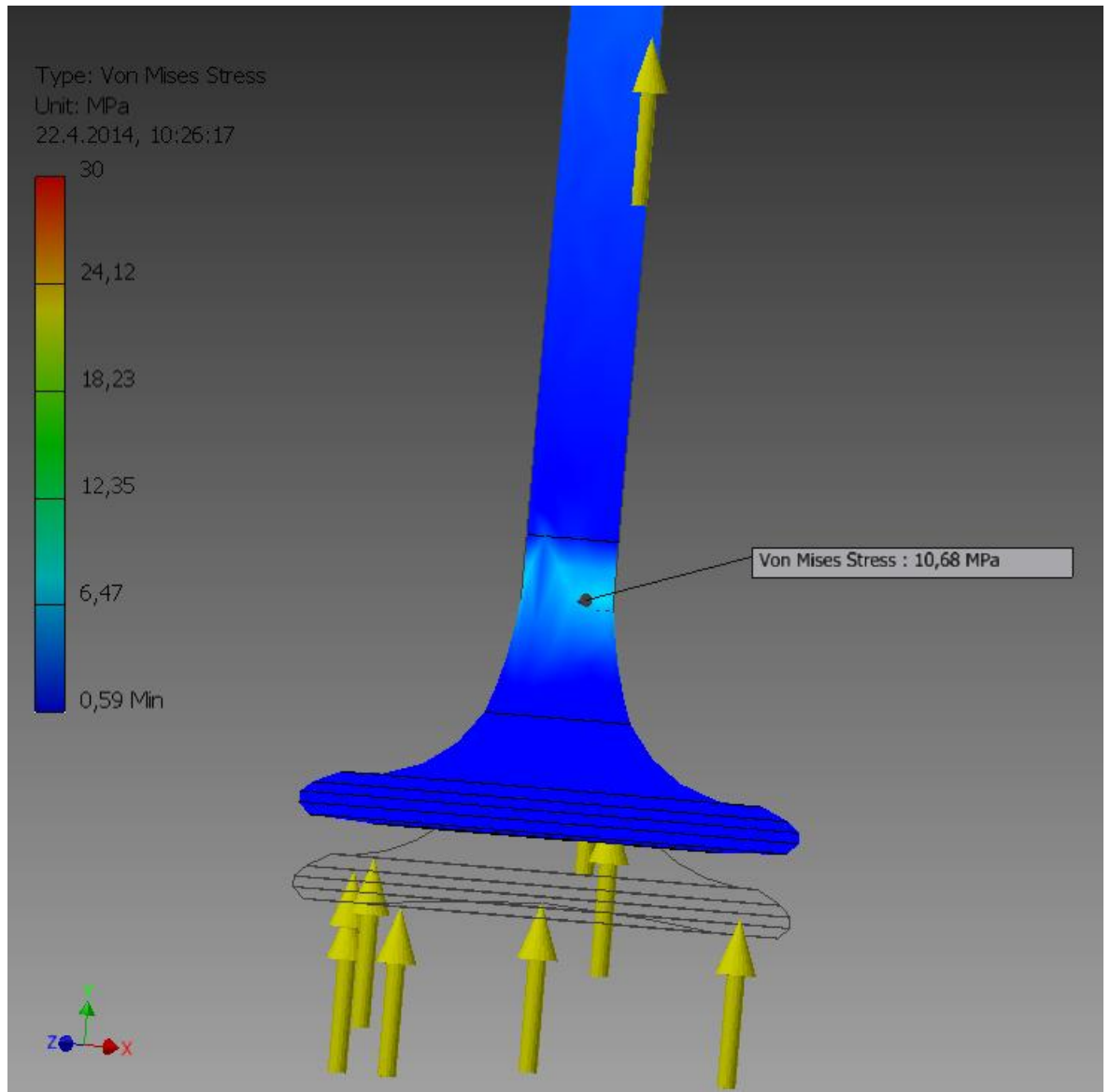
Suurin vetojännitys esiintyy sokkaurassa noin  $18^\circ$  ennen imuventtiilin sulkeutumista. Tällöin venttiilin hidastuvuus aiheuttaa 539,6 N:n voiman, minkä vaikutusta vähentää venttiilijousen aiheuttama vastakkaissuuntainen 430 N:n suuruinen voima. Näiden voimien yhteisvaikutuksesta sokkauran pohjalle syntyy 29,5 MPa:n vetojännitys (kuvio 43).



Kuvio 43. Lukitusuraan kohdistuva vetojännitys.

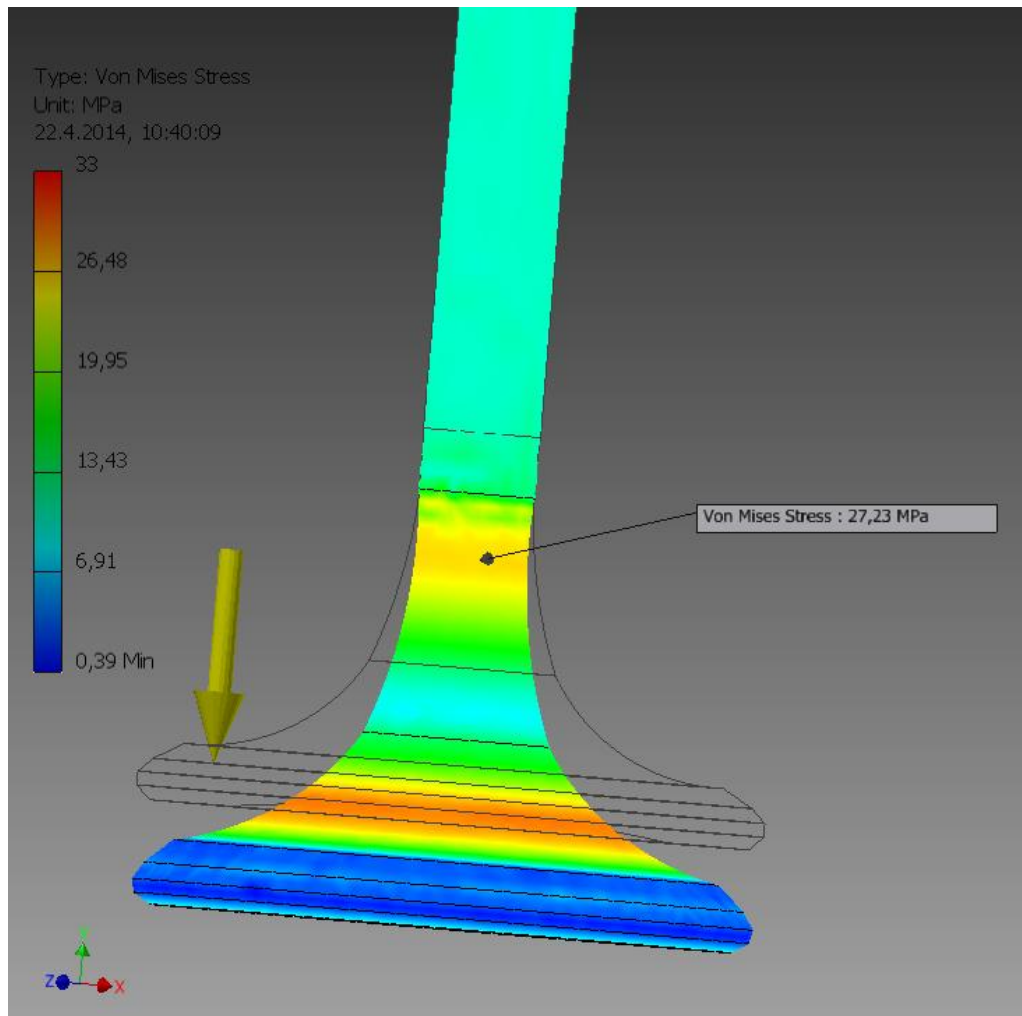
### 7.12.2 Venttiilivarren maksimijännitykset

Venttiilivarren ja venttiilin lautasosuuden yhdistymiskohtaan syntyy suurin puristusjännitys samalla hetkellä kuin venttiilin sokkauraan. Tällöin edellä mainitut voimat aiheuttavat alueelle 10,7 MPa:n puristusjännityksen (kuvio 44).



Kuvio 44. Venttiilivarren suurin puristusjännitys.

Vetojännityksen maksimiarvo syntyy tilanteessa, jolloin venttiililautasen tiivistepinta osuu sylinterikannen seetirenkaaseen. Tällöin venttiin liikkeen hidastuvuus aiheuttaa 313,6 N:n voiman. Kyseisellä hetkellä venttiilijousen aiheuttama voima on 412 N. Näiden voimien vaikutuksesta alueelle syntyy 27,2 MPa:n vetojännitys (kuvio 45). Mielenkiintoista on huomata, että 8500 rpm:n käyntinopeudella venttiin sulkeutuessa tiivistepinnassa tapahtuu noin 0,013 mm siirtymä (Liite 8).



Kuvio 45. Venttiilivarren suurin vetojännitys.

### 7.12.3 Varmuusluku väsymisen suhteen

Venttiilin liikkeen aikana hetkelliset jännitykset ovat melko pieniä 580 MPa:n myötörajaan verrattuna. Moottorin korkean käyntinopeuden ja venttiilin lukemattomien avautumis- ja sulkeutumiskertojen vaikutuksesta onkin järkevää tutkia materiaalin väsymistä. Imuventtiilin varmuusluvun määrittäminen materiaalin väsymisen suhteen aloitetaan laskemalla tarkastelukohteen keskijännitys ja jännitysamplitudi.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (3)$$

$\sigma_m$  = keskijännitys tarkastelualueella

$\sigma_a$  = jännitysamplitudi tarkastelualueella

$\sigma_{max}$  = jännityksen maksimiarvo tarkastelualueella (suurin puristusjännitys)

$\sigma_{min}$  = jännityksen minimiarvo tarkastelualueella (suurin vetojännitys)

Tarkastellessa venttiilin kestävyyttä lukitusuran alueella keskijännitykseksi ja jännitysamplitudiksi muodostuvat seuraavat arvot:

$$\sigma_m = \frac{29,5 \text{ MPa} + (-89,4 \text{ MPa})}{2} = -29,95 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \frac{29,5 \text{ MPa} + 89,4 \text{ MPa}}{2} = 59,45 \text{ MPa}$$

Seuraavassa vaiheessa lasketaan redusoitu väsymisvaihtolujuus.

$$\sigma_{Wred} = m * k_\sigma * \sigma_W \quad (4)$$

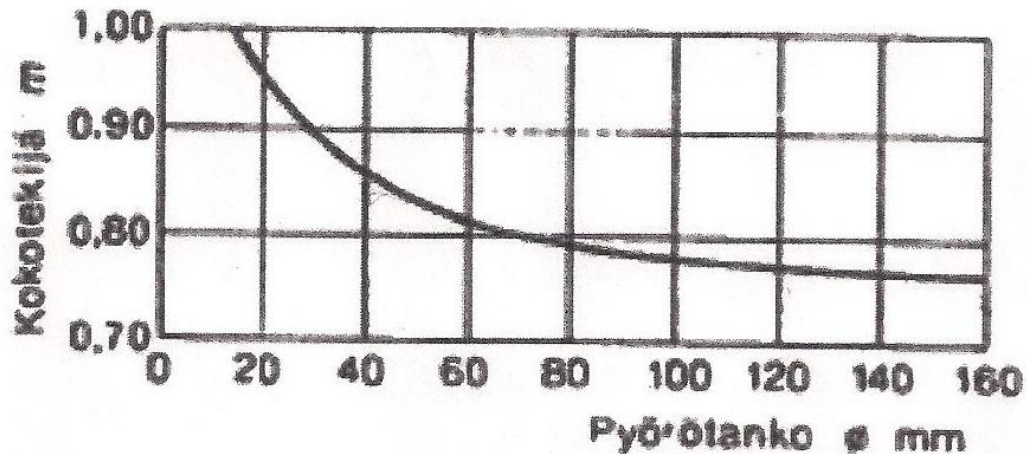
$m$  = koon vaikutusluku

$k_\sigma$  = pinnanlaatukerroin normaalijännityksille

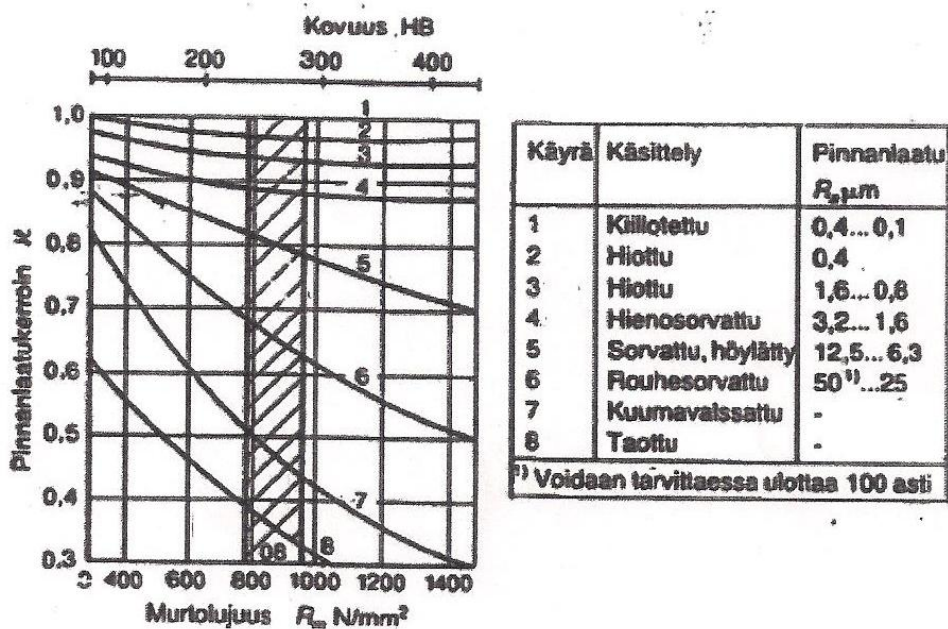
$\sigma_W$  = veto/puristusväsymislujuus ( $\approx 0,43 * \text{murtolujuus}$ )



Koon vaikutusluku riippuu aihiomateriaalin halkaisijasta. Imuventtiin lautasen halkaisija on 32 mm, joten oletetaan aihion olevan halkaisijaltaan tämän suuruinen pyörötanko. Näin ollen kuvion 46 perusteella koon vaikutusluvaksi saadaan 0,88. Pinnanlaatukerroin määritetään graafisesti kuvion 47 tiedoista. Tässä tapauksessa materiaalia määritetään hienosorvatuksi, jolloin pinnanlaatukertoimeksi saadaan 0,9.



Kuvio 46. Koon vaikutusluku pyörötangolle (MET 1994).



Kuvio 47. Pinnanlaatukerroin (MET 1994).



Näiden tietojen perusteella redusoituneeksi väsymisvaihtolujuudeksi saadaan:

$$\sigma_{Wred} = m * k_{\sigma} * \sigma_W = 0,88 * 0,9 * 400 \text{ MPa} = 316,8 \text{ MPa}$$

Varsinainen venttiilin varmuusluku väsymisen suhteen lasketaan kaavalla:

$$n = \left( \frac{\sigma_a}{\sigma_{Wred}} + \frac{\sigma_m}{R_m} \right)^{-1} \quad (5)$$

$R_m = \text{murtolujuus}$

$$n = \left( \frac{59,45 \text{ MPa}}{316,8 \text{ MPa}} + \frac{-29,95 \text{ MPa}}{950 \text{ MPa}} \right)^{-1} \approx 6,4$$

Samalla tavalla laskettuna venttiilivarren alaosan varmuusluvuksi väsymisen suhteen saadaan noin 20,5. Tarkastelun perusteella nokkaprofiili ei aiheuta venttiiliin jännityksiä, mitkä voisivat rikkoa sen materiaalin väsymisen johdosta. Varmuusluvun ollessa näinkin suuri voidaan venttiilin todeta olevan mitoitettu äärettömälle kestoialle.

## 8 YHTEENVETO

Nokka-akselin toiminta vaikuttaa huomattavan paljon moottorin ominaisuuksiin ja venttiilikoneiston kestävyteen. Näin ollen uutta profiilia suunnitellessa tai valmistusta nokka-akselia ostettaessa on syytä perehtyä akselin toimintaan, jotta päästäisiin haluttuun lopputulokseen.

Tässä opinnäytetyössä ideoitu nokkaprofiili pitäisi esitetyn teorian ja käytännön kokemusten pohjalta olla käyttökelpoinen tarkastelun kohteena olevaan Toyotan moottoriin. On kuitenkin muistettava, että tehodynamometrimittaukset kertovat vasta viimekädessä totuuden moottorin suorituskyvystä. On hyvin yleistä, että parhaita vääntö- ja teho-ominaisuuksia etsittäessä moottoria testataan dynamometrissä muun muassa erilaisten nokkien, pakosarjojen ja imusarjojen yhdistelmillä. Teorian ymmärtäminen luo kuitenkin aina pohjan viritystyölle.

Suunnitellun nokkaprofiilin lyhennetyt aukioloajat pitäisi tuoda moottorin teoreettisen huipputehon kierroslukua hieman alaspäin, sillä vanhan imunokka-akselin 272° aukioloaika saattaa olla hieman liian pitkä moottorille, jonka maksimikäyntinopeus on rajoitettu noin 8500 kierrokseen minuutissa. Suunniteltuun nokka-akseliprofiiliin liittyvää teoriaa tukevat myös käytännön dynamometrimittaukset, joissa pakonokka-akselin kaltaisen profiilin on todettu mahdollistavan suorituskykyisen moottorin. Venttiilin aukioloajan kasvattaminen suuren venttiilin avautuman aikaan takaa hyvän sylinterin täytösasteen. Täytösasteen tarkka määrittäminen on kuitenkin hankalaa, sillä sylinteriin virtaa seosta muulloinkin kuin varsinaisen imutahdin aikaan.

Nokkaprofiilia suunnitellessa venttiilikoneiston kestävyden tutkimisesta muodostuu vähintäänkin yhtä huomionarvoinen asia kuin itse moottorin suorituskyvyn lisäämisestä. Mekaaniseen venttiilikoneistoon syntyy helposti liiallisia rasituksia, mikäli liikkuvien osien kiihtyvyyksiä ja nopeuksia ei suunnitteluvaiheessa huomioida. Työssä tehtyjen laskelmien ja raja-arvojen perusteella suunniteltu nokkaprofiili ei aiheuta vaaraa venttiilikoneiston toiminnalle. Venttiilikoneistoon syntyviä voimia tutkiessa ymmärtää varsin helposti liikkuvien osien massan merkityksen syntyviin rasituksiin. Ei ole ihmeäkään, että esimerkiksi kilpaventtiileiden valmistajat pyrkivät pitämään osien massat mahdollisimman pieninä.

Nokka-akselin toiminta vaikuttaa hyvin moneen asiaan, joten ammattilaiset käyttävät suunnittelutyössä siihen tarkoitettuja tietokoneohjelmia. Opinnäytetyötä olisikin voinut parantaa, mikäli profiilin suunnittelussa olisi ollut käytössä jokin suunnitteluohjelma. Kaasunvaihdon tarkempi tutkiminen overlap-jakson aikaan ja seoksen käyttäytymisen ymmärtäminen puristustahdin alussa toisi huomattavan paljon käyttökelpoista tietoa nokka-akselin suunnittelijalle. Tällainen seoksen virtauksen tutkiminen tarkasti on kuitenkin niin hankalaa, ettei se ollut mahdollista opinnäytetyön aikataulun ja resurssien rajoissa. Oman haasteensa suunnitteluun teki moottorissa olevat erittäin hyviksi havaitut nokka-akselit, joiden parantaminen osoittautui todella hankalaksi. Opinnäytetyön painoarvoa olisi myös kohottanut huomattavasti, mikäli työn tekemisen aikana suunnitellusta profiilista olisi ehtinyt teetättämään varsinaisen nokka-akselin ja testaamaan tätä käytännön tehodynamometri-mittauksissa.

Tässä työssä tulee kuitenkin esille nokka-akseleihin liittyvät keskeiset asiat, jotka auttavat ymmärtämään perinteisen mekaanisen venttiilikoneiston toiminnan. Ilman suunnitteluohjelmia tehty tutkiminen auttoi myös sisäistämään nokka-akselin suunnittelun perustan. Perehdyttyään nokkaprofiilin vaikutuksiin ja suunnitteluun perinteisin menetelmin olisi suunnitteluohjelmien ymmärtäminen nyt huomattavasti helpompaa.

## LÄHTEET

- Ahonen, V. 2008. Formula student moottorin kehitystyö. Stadia. Tekniikan ja liikenteen toimiala. Insinööriyö. [Viitattu 13.4.2014]. Saatavana: <http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/1598/Formulas.pdf?sequence=1>
- Autoteknillinen taskukirja. 2003. Helsinki: Autoalan koulutuskeskus.
- Bell, A. 1981. Four stroke performance tuning. United Kingdom: G T Foulis & Co Ltd
- Bell, A. 2007. Nelitahtimoottorin virittäminen. Suomentaja Esko Mauno. Helsinki: Alfamer Oy
- Bell, A. 1998. Uusi Moottoritekniikka: Virittäminen ja säätäminen. Suomentaja Esko Mauno. Helsinki: Alfamer Oy.
- Hammill, D. 2014. How to choose camshafts & time them for maximum power. 4. Dorchester: Veloce Publishing Ltd
- Heisler, H. 2001. Advanced engine technology. 2. London: Butterworth-Heinemann.
- Hotrod 1.4.2010. Cam And Lifter Technology- What's New In Cams. [Verkkoleh-tiartikkeli]. [Viitattu 6.4.2014]. Saatavana: [http://www.hotrod.com/techarticles/engine/hrdp\\_1004\\_cam\\_lifter\\_technology/](http://www.hotrod.com/techarticles/engine/hrdp_1004_cam_lifter_technology/)
- Juurikkala, J. 1989. Autotekniikan käsikirja: Moottori. Helsinki: Tammi
- Laukkanen, P. 2013- 2014. Toimitusjohtaja. Speedfactory. Puhelinkeskustelut 2013- 2014.
- Mauno, E. 2005. Virittäjän käsikirja 1: Nelitahtimoottorit. Helsinki: Alfamer Oy
- MET 1994. Raaka-ainekäsikirja 1: Muokatut teräkset. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy
- Moon, C H. 1961. Cam design: a manual for engineers, designers and draftsmen. [Verkkokirja]. Easton: Commercial cam division, Emerson Electric Company. [Viitattu 1.4.2014]. Saatavana: <http://www.camcoindex.com/svcman/moonbook.pdf>
- Renault. 12.2008. Camless Engine. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 25.3.2014]. Saatavana: <http://www.renault.com/en/lists/archivesdocuments/camless-engine.pdf>

Tagliavini, W. <xxxxxx@supertechperformance.com> 2.4.2014. Bucket lifters. [Henkilökohtainen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Jussi Ollikkala. [Viitattu 2.4.2014]

Urrutia, D. <xxxxxx@ferrea.com> 6.3.2014. Valve material. [Henkilökohtainen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Jussi Ollikkala. [ Viitattu 6.3.2014].

## LIITTEET

Liite 1. Tehomittaustodistus

Liite 2. Virtauspöytäkirja

Liite 3. Malliakseleiden mittauspöytäkirja (Speedfactory)

Liite 4. Malliakseleiden profiilikuvaaja

Liite 5. Suunnitellun profiilin tiedot

Liite 6. Venttiilivälysten mittauspöytäkirja

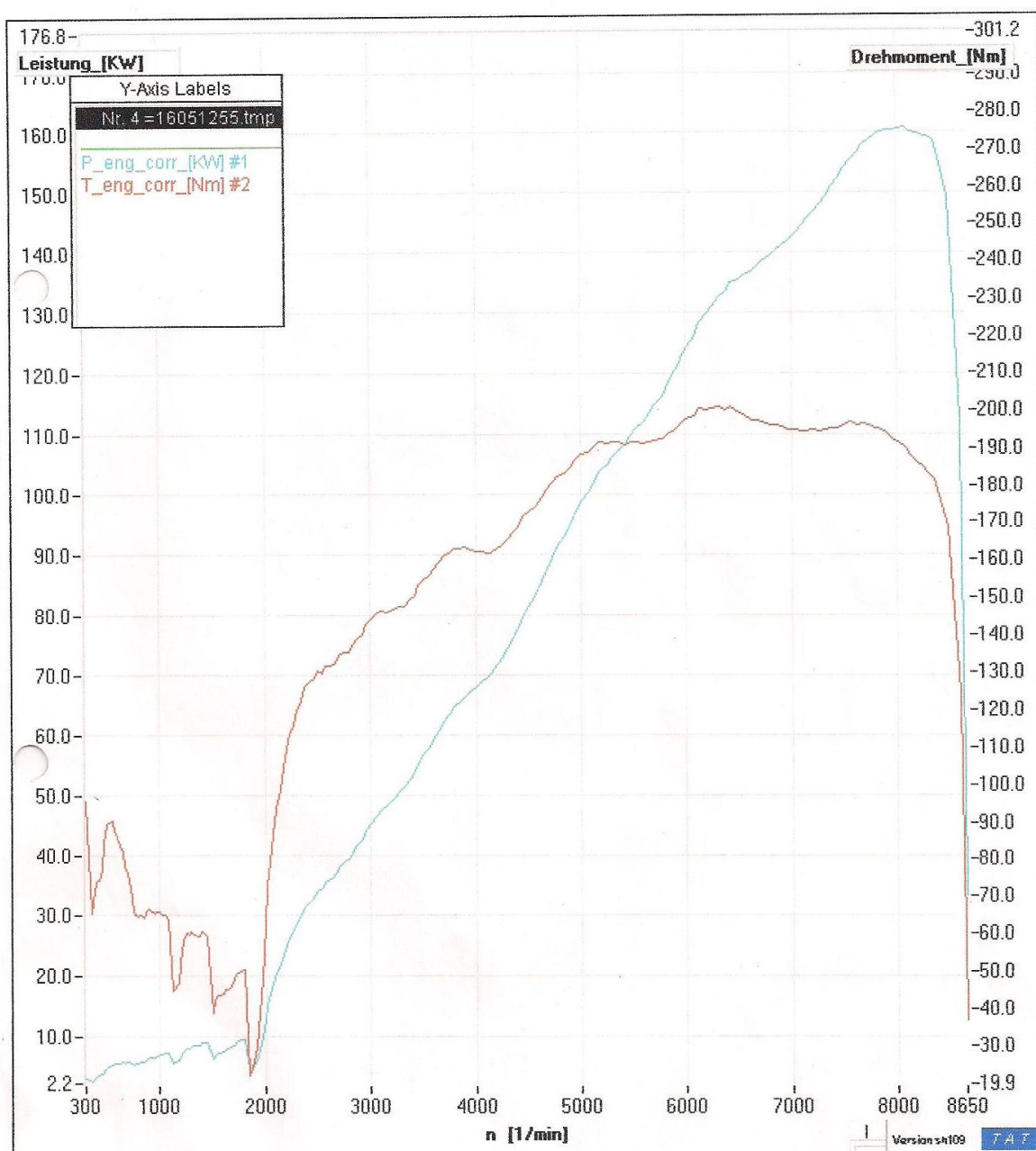
Liite 7. Venttiiliin kohdistuvat voimat

Liite 8. Venttiilin tiivistepinnan siirtymäkuvaaja

## LIITE 1. Tehomittaustodistus

**Motorset Ky**  
**69100 Kannus, Finland**  
**puh.0400-789711**

FILE: 16051255.tmp  
 Maxima (corr.): 161 KW (219 Hp) / 8075 RPM and 201 Nm / 6300 RPM  
 )\*\*\*\_Comments\_End



## LIITE 2. Virtauspöytäkirja

SuperFlow SF-110/120FC Virtauspöytäkirja		Testipvm: #####	Testi: keskiarvo						
Testattava kansi:	Toyota 4age	Omistaja: Ollikkala	Testaaja: Ollikkala						
Kannen versio:	Opinnäytetyö	Palotilan muoto: M	M=Muut, K=Kiila						
Sylinterin halkaisija:	81,2 mm	Iskun pituus: 77,0 mm	Sylinterien lkm: 4						
Tilavuus / sylinteri	24,3 in3	Sylinteri tilavuus: 97 in3							
Testin asetukset									
	Halkaisija	Varsi	Noston lisäys	Venttiilin nettoala	Venttiilit				
Imuventtiili	32 mm	6 mm	1,600 mm	2,404 in2	2				
Pakovenntiili			0,000 mm	0,000 in2					
Virtausalue									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ylätulpat	1	2	1+2	1+3	1+2+3	1+3+4	1+2+3+4	1+2+3+5	1+2+3+4+5
Korjattu alue (imu)	9,3	18,0	29,0	39,4	58,3	81,8	102,4	138,0	182,5
Korjattu alue (pako)	9,3	18,2	30,7	41,6	61,5	86,3	105,8	138,2	183,8
Imupuolen testaustiedot									
1 Testin numero	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2 Testipaine "	10	10	10	10	10	10	10	10	10
3 Venttiilin nosto (oletus)	1,00	3,00	5,00	7,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00
Venttiilin nosto (oma mm)	1,00	3,00	5,00	7,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00
4 Virtausalue	3	6	8	9	9	9	9	9	9
Virtausalueen arvo	29,0	81,8	138,0	182,5	182,5	182,5	182,5	182,5	182,5
5 Mitattu virtaus	17,8	55,5	89,8	109,9	118,7	121,2	123,2	124,3	125,0
6 Tesivirtaus cfm/in2	7,4	23,1	37,3	45,7	49,4	50,4	51,2	51,7	52,0
7 Optimaalinen virtaus	9,6	26,8	41,5	52,0	59,9	62,5	64,0	64,4	63,9
8 % Optimaalisesta	77,1%	86,1%	90,0%	87,9%	82,4%	80,7%	80,1%	80,3%	81,4%
9 L/D suhde	0,03	0,09	0,16	0,22	0,28	0,31	0,34	0,38	0,41
10 Purkautumiskerroin Cd	0,08	0,27	0,43	0,52	0,57	0,58	0,59	0,59	0,60
Keskiarvo virtaus: 98,4 Maksimi virtaus: 125 cfm									
Pakupuolen testaustiedot									
1 Testin numero	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2 Testipaine	10	10	10	10	10	10	10	10	10
3 Venttiilin nosto (oletus)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Venttiilin nosto (oma mm)									
4 Virtausalue									
Virtausalueen arvo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5 Mitattu virtaus									
6 Tesivirtaus cfm/in2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7 Optimaalinen virtaus	16,0	29,9	41,5	50,7	57,6	62,1	64,2	63,9	63,9
8 % Optimaalisesta	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
9 L/D suhde	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
10 Purkautumiskerroin Cd	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Keskiarvo virtaus: ##### Maksimi virtaus: 0 cfm									
Laskennallinen teho / sylinteri:	39,5 kW	53,7 hv	Pako- / imuvirtauksen suhde:	0,00%					
Laskennallinen teho:	158,1 kW	215,0 hv	Parhaan tehon kierrokset:	10275					

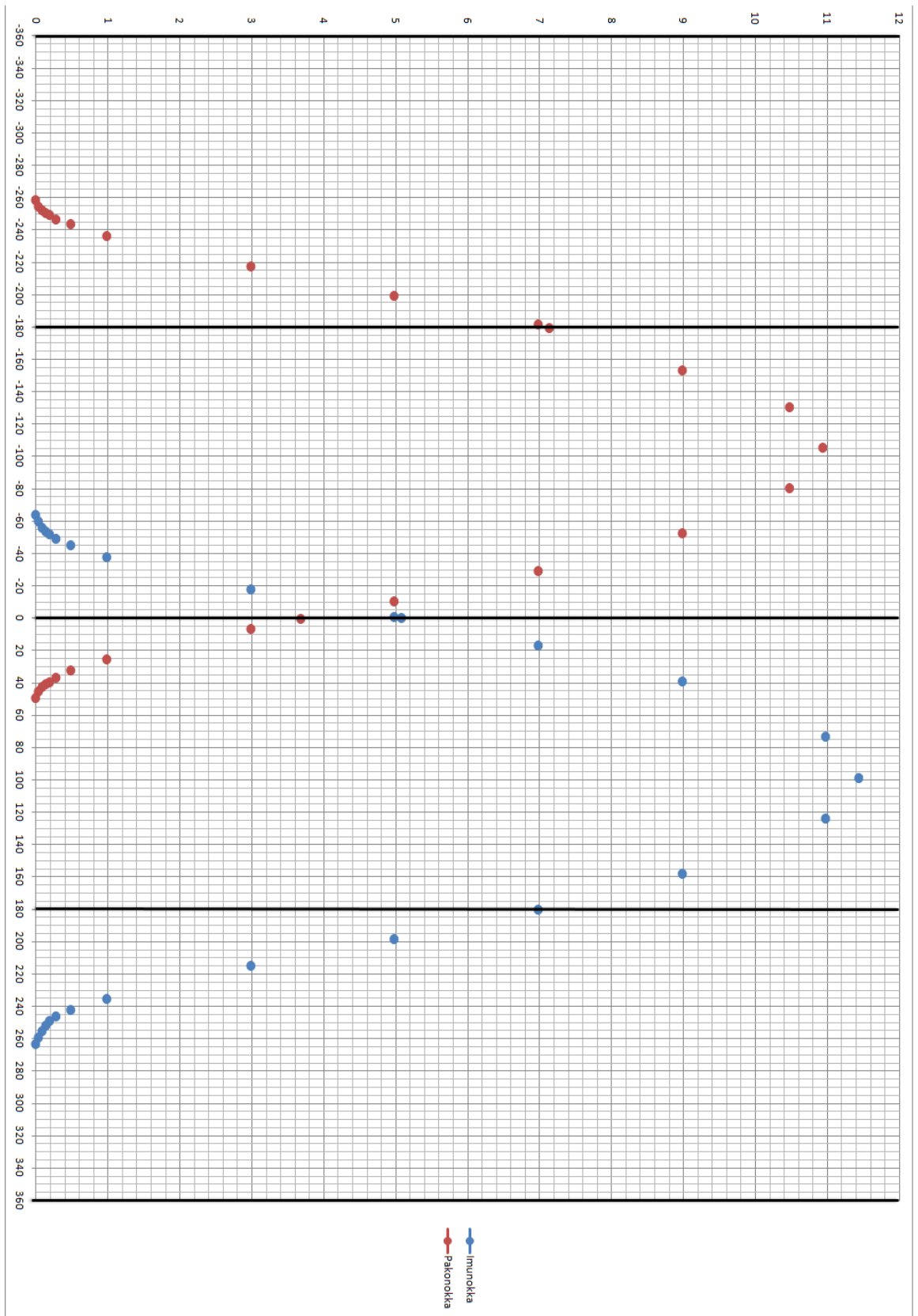


### LIITE 3. Malliakseleiden mittauspöytäkirja (Speedfactory)

11 1106 5182 LARD NUMBER

J. 25					D. 30				
.01	64	99.5	83	327°	.01	79	105	49	308°
.05	60		79		.05	75		45	
.10	56		75		.10	73		42	
.15	54		72		.15	71		40	
.20	52		69		.20	70		39	
.30	49		66		.30	67		36	
.50	45		62		.50	64		32	
1.00	38	98.5	55	273°	1.00	57	106	25	262°
3.00	18		35		3.00	38		6	
5.00	1		18		5.00	20		11	
7.00	17		180		7.00	2		30	
9.00	39		158		9.00	150		53	
11.00	73	98.5	124		10.50	131	106	81	
11W Ymax.		5.10			11W Ymax.		3.70		
11W Xmax.		7.00			11W Xmax.		7.15		
11W Zmax.		11.45			11W Zmax.		10.95		

## LIITE 4. Malliakseleiden profiilikuvaaja



## LIITE 5. Suunnitellun profiilin tiedot

Kampiakselin kiertokulma /°	Venttiilin nousu /mm	Seuraajan nopeus mm/°	Seuraajan nopeuden muutos	Seuraajan kiihtyvyys mm/°/°
0	0,009296			
		0,017383662	0,025649577	0,007225233
7,086954347	0,071008			
		0,043033239	0,029908732	0,008424995
14,17390869	0,223776			
		0,072941972	0,029719437	0,008371672
21,26086304	0,48272			
		0,102661408	0,028394366	0,007998413
28,34781739	0,847168			
		0,131055775	0,026154366	0,007367427
35,43477173	1,312416			
		0,157210141	0,023125634	0,006514263
42,52172608	1,870512			
		0,180335775	0,019402817	0,005465582
49,60868043	2,510704			
		0,199738592	0,015112113	0,004256933
56,69563477	3,219776			
		0,214850704	0,010348169	0,002914977
63,78258912	3,982496			
		0,225198873	0,005237183	0,001475263
70,86954347	4,781952			
		0,230436056	0	0
77,95649781	5,6			
		0,230436056	-0,005237183	-0,001475263
85,04345216	6,418048			
		0,225198873	-0,010348169	-0,002914977
92,13040651	7,217504			
		0,214850704	-0,015112113	-0,004256933
99,21736085	7,980224			
		0,199738592	-0,019402817	-0,005465582
106,3043152	8,689296			
		0,180335775	-0,023125634	-0,006514263
113,3912695	9,329488			
		0,157210141	-0,026154366	-0,007367427
120,4782239	9,887584			
		0,131055775	-0,028394366	-0,007998413
127,5651782	10,352832			
		0,102661408	-0,029719437	-0,008371672
134,6521326	10,71728			
		0,072941972	-0,029908732	-0,008424995
141,7390869	10,976224			
		0,043033239	-0,025649577	-0,007225233
148,8260413	11,128992			
		0,017383662	-0,01476507	-0,004159175
155,9129956	11,190704			
		0,002618592	-0,005237183	-0,001475263
162,99995	11,2			

162,99995	11,2			
		-0,002618592	-0,01476507	-0,004159175
170,09995	11,190704			
		-0,017383662	-0,025649577	-0,007225233
177,19995	11,128992			
		-0,043033239	-0,029908732	-0,008424995
184,29995	10,976224			
		-0,072941972	-0,029719437	-0,008371672
191,39995	10,71728			
		-0,102661408	-0,028394366	-0,007998413
198,49995	10,352832			
		-0,131055775	-0,026154366	-0,007367427
205,59995	9,887584			
		-0,157210141	-0,023125634	-0,006514263
212,69995	9,329488			
		-0,180335775	-0,019402817	-0,005465582
219,79995	8,689296			
		-0,199738592	-0,015112113	-0,004256933
226,89995	7,980224			
		-0,214850704	-0,010348169	-0,002914977
233,99995	7,217504			
		-0,225198873	-0,005237183	-0,001475263
241,09995	6,418048			
		-0,230436056	0	0
248,19995	5,6			
		-0,230436056	0,005237183	0,001475263
255,29995	4,781952			
		-0,225198873	0,010348169	0,002914977
262,39995	3,982496			
		-0,214850704	0,015112113	0,004256933
269,49995	3,219776			
		-0,199738592	0,019402817	0,005465582
276,59995	2,510704			
		-0,180335775	0,023125634	0,006514263
283,69995	1,870512			
		-0,157210141	0,026154366	0,007367427
290,79995	1,312416			
		-0,131055775	0,028394366	0,007998413
297,89995	0,847168			
		-0,102661408	0,029719437	0,008371672
304,99995	0,48272			
		-0,072941972	0,029908732	0,008424995
312,09995	0,223776			
		-0,043033239	0,025649577	0,007225233
319,19995	0,071008			
		-0,017383662	0,017383662	0,004896806
326,29995	0,009296			



## LIITE 6. Venttiilivälysten mittauspöytäkirja

Venttiilivälökset 28.4.2014

Kylmänä

<u>Imu</u>		<u>Pako</u>	
1)	0,15	1)	0,20
2)	0,15	2)	0,20
3)	0,15	3)	0,25
4)	0,15	4)	0,25
5)	0,15	5)	0,25
6)	0,15	6)	0,25
7)	0,10	7)	0,20
8)	0,05 *	8)	0,20

Jäähdytysneste +80°C

<u>Imu</u>		<u>Pako</u>	
1)	0,25	1)	0,25
2)	0,25	2)	0,25
3)	0,20	3)	0,30
4)	0,25	4)	0,30
5)	0,20	5)	0,30
6)	0,20	6)	0,30
7)	0,20	7)	0,25
8)	0,20	8)	0,30

\* Käytön jälkeen, moottorin jäähdyttyä välys asetettiin 0,15 millimetriin

## LIITE 7. Venttiiliin kohdistuvat voimat

Kampiakselin kiertokulma /°	Venttiilin nousu /mm	Keskikiikhtyvyyys m/s <sup>2</sup>	Voima (F=ma) /N	Jousivoima /N
0	0,009296			
		4698,058403	462,7587527	414,0482338
7,086954347	0,071008			
		5478,178802	539,600612	419,5187607
14,17390869	0,223776			
		5443,506785	536,1854183	430,019887
21,26086304	0,48272			
		5200,80266	512,279062	445,9201233
28,34781739	0,847168			
		4790,517117	471,865936	467,0823495
35,43477173	1,312416			
		4235,764833	417,2228361	493,1837616
42,52172608	1,870512			
		3553,881818	350,0573591	523,7472953
49,60868043	2,510704			
		2767,982749	272,6463008	558,1616229
56,69563477	3,219776			
		1895,403636	186,6972582	595,7011496
63,78258912	3,982496			
		959,2591574	94,487027	635,5460107
70,86954347	4,781952			
		0	0	676,8020677
77,95649781	5,6			
		-959,2591574	-94,487027	718,5323323
85,04345216	6,418048			
		-1895,403636	-186,6972582	759,7883893
92,13040651	7,217504			
		-2767,982749	-272,6463008	799,6332504
99,21736085	7,980224			
		-3553,881818	-350,0573591	837,1727771
106,3043152	8,689296			
		-4235,764833	-417,2228361	871,5871047
113,3912695	9,329488			
		-4790,517117	-471,865936	902,1506384
120,4782239	9,887584			
		-5200,80266	-512,279062	928,2520505
127,5651782	10,352832			
		-5443,506785	-536,1854183	949,4142767
134,6521326	10,71728			
		-5478,178802	-539,600612	965,314513
141,7390869	10,976224			
		-4698,058403	-462,7587527	975,8156393
148,8260413	11,128992			
		-2704,417383	-266,3851123	981,2861662
155,9129956	11,190704			
		-959,2591574	-94,487027	983,0972962
162,99995	11,2			

162,99995	11,2			
		-2704,417383	-266,3851123	983,0972962
170,09995	11,190704			
		-4698,058403	-462,7587527	981,2861662
177,19995	11,128992			
		-5478,178802	-539,600612	975,8156393
184,29995	10,976224			
		-5443,506785	-536,1854183	965,314513
191,39995	10,71728			
		-5200,80266	-512,279062	949,4142767
198,49995	10,352832			
		-4790,517117	-471,865936	928,2520505
205,59995	9,887584			
		-4235,764833	-417,2228361	902,1506384
212,69995	9,329488			
		-3553,881818	-350,0573591	871,5871047
219,79995	8,689296			
		-2767,982749	-272,6463008	837,1727771
226,89995	7,980224			
		-1895,403636	-186,6972582	799,6332504
233,99995	7,217504			
		-959,2591574	-94,487027	759,7883893
241,09995	6,418048			
		0	0	718,5323323
248,19995	5,6			
		959,2591574	94,487027	676,8020677
255,29995	4,781952			
		1895,403636	186,6972582	635,5460107
262,39995	3,982496			
		2767,982749	272,6463008	595,7011496
269,49995	3,219776			
		3553,881818	350,0573591	558,1616229
276,59995	2,510704			
		4235,764833	417,2228361	523,7472953
283,69995	1,870512			
		4790,517117	471,865936	493,1837616
290,79995	1,312416			
		5200,80266	512,279062	467,0823495
297,89995	0,847168			
		5443,506785	536,1854183	445,9201233
304,99995	0,48272			
		5478,178802	539,600612	430,019887
312,09995	0,223776			
		4698,058403	462,7587527	419,5187607
319,19995	0,071008			
		3184,046962	313,6286258	414,0482338
326,29995	0,009296			

**LIITE 8. Venttiilin tiivistepinnan siirtymäkuvaaja**